

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jurica Radić

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Jurica Radić

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Veri Rede na pomoći i usmjeravanju pri izradi ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji na pomoći i podršci tijekom studiranja.

Jurica Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **JURICA RADIĆ**

Mat. br.: 0035153792

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Mikrostrukturalna analiza zavarenog spoja Ni-Cu legure

Naslov rada na
engleskom jeziku:

The microstructural analysis of a Ni-Cu alloy weld

Opis zadatka:

Za dokazivanje kvalitete zavarenog spoja, uz ostala ispitivanja i kontrole, provodi se i metalografsko ispitivanje zavora. Može se opravdano reći da je metalografsko ispitivanje nezaobilazno u svakoj ozbiljnjoj analizi utjecajnih čimbenika pri zavarivanju.

U završnom radu potrebno je napraviti sljedeće:

- opisati osnovni materijal i primijenjeni postupak zavarivanja Ni-Cu legure,
- pripremiti ispitne uzorke za makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje,
- vizualno analizirati zavar (makroskopski),
- napraviti kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture zavarenog spoja.

Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

14. studenog 2011.

Zadatak zadala:

Rede
Doc. dr. sc. Vera Rede

Rok predaje rada:

- 1. rok: 10. veljače 2012.
- 2. rok: 6. srpnja 2012.
- 3. rok: 14. rujna 2012.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 15., 16. i 17. veljače 2012.
- 2. rok: 9., 10. i 11. srpnja 2012.
- 3. rok: 19., 20. i 21. rujna 2012.

Predsjednik Povjerenstva:

Dubravko
Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

Sadržaj:

1. Uvod	1
2. Nikal	2
2.1. Svojstva, dobivanje i primjena	2
2.2. Legure nikla.....	4
2.2.1. Nikal 200	4
2.2.2. Ostale legure nikla	6
3. Monel	10
3.1. Monel 400	13
4. Metalografsko ispitivanje zavarenog spoja.....	18
5. Eksperimentalni dio	20
5.1. Cilj rada i provođenja ispitivanja	20
5.2. Materijal za ispitivanje	20
5.2.1. Osnovni materijal	21
5.2.2. Dodatni materijal	21
5.2.3. Zavareni spoj	23
5.3. Priprema uzoraka.....	25
5.4. Analiza mikrostrukture.....	30
5.4.1. Kvalitativna analiza mikrostrukture	30
5.4.1.1. Polirano stanje	30
5.4.1.2. Nagriženo stanje	33
5.4.2. Kvantitativna analiza mikrostrukture	46
5.4.2.1. Volumni udjeli mikrostrukturnih faza	46
5.4.2.2. Veličina zrna.....	46
5.4.2.3. Mikrotvrdoća, HV 0,2	46
5.5. Mehanička ispitivanja.....	49
6. Analiza rezultata	51
6.1. Osvrt na analizu mikrostrukture.....	51
6.2. Osvrt na ispitivanja mehaničkih svojstva	53
7. Zaključak	54
8. Literatura.....	55

Popis slika:

Slika 1: Plošno centrirana kubična kristalna struktura nikla ($a=352.38$ pm) [2].....	3
Slika 2: Kovanice nizozemskog novca izrađene od nikla [1]	4
Slika 3: Trojni izotermni dijagram Cu-Fe-Ni pri 1200°C, [14].....	11
Slika 4: North American X-15 u letu [15]	12
Slika 5: Otpornost na puzanje toplo valjanog Monela 400, [19]	16
Slika 6: Tipična mikrostruktura hladno vučene šipke legure Monel 400, [19]	17
Slika 7: Uža cijev Monela 400 (lijevo), i šira cijev (desno)	20
Slika 8: Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja, [21].....	23
Slika 9: Pozicija zavarivanja H-L045	23
Slika 10: Priprema spoja	24
Slika 11: Redoslijed prolaza	24
Slika 12: Izrezani uzorci iz prstena cijevi; lijevo – uža cijev, desno – šira cijev	25
Slika 13: Rezalica Struers Accutom-2	26
Slika 14: Uzorci zaliveni u masu	26
Slika 15: Uređaj za brušenje Buehler: Phoenix Alpha	27
Slika 16: Uzorci u ultrazvučnoj čistilici Pro'sKit SS-802.....	28
Slika 17: Uređaj za brušenje i poliranje (Struers DAP-V).....	29
Slika 18: Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51.....	30
Slika 19: Osnovni materijal uzorka M, u poliranom stanju	31
Slika 20: Površina uzorka M u području metala zavora, u poliranom stanju	31
Slika 21: Osnovni materijal uzorka V, u poliranom stanju.....	32
Slika 22: Površina uzorka V u području metala zavora, u poliranom stanju	32
Slika 23: Makro nagriženi uzorak zavarenog spoja, uzorak M	33
Slika 24: Makro nagriženi uzorak zavarenog spoja, uzorak V	34
Slika 25: Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka M	35
Slika 26: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka M, lijevo	35
Slika 27: Mikrostruktura zone utjecaja topline sredine zavora uzorka M, lijevo	36
Slika 28: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka M, lijevo	36
Slika 29: Mikrostruktura metala zavora u tjemenu uzorka M	37
Slika 30: Mikrostruktura metala zavora u sredini uzorka M.....	37
Slika 31: Mikrostruktura metala zavora u korijenu uzorka M	38
Slika 32: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka M, desno.....	38
Slika 33: Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora uzorka M, desno	39
Slika 34: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka M, desno	39
Slika 35: Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka V	40
Slika 36: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka V, lijevo	40
Slika 37: Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora uzorka V, lijevo.....	41
Slika 38: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka V, lijevo	41
Slika 39: Mikrostruktura metala zavora u tjemenu uzorka V	42
Slika 40: Mikrostruktura metala zavora u sredini uzorka V	42
Slika 41: Mikrostruktura metala zavora u sredini uzorka V.....	43

Slika 42: Mikrostruktura metala u korijenu zavora uzorka V	43
Slika 43: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka V, desno	44
Slika 44: Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora uzorka V, desno	44
Slika 45: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka V, desno	45
Slika 46: Mikrostruktura linije staljivanja uzorka V	45
Slika 47: Mikrotvrdomjer WILSON-WOLPERT TUKON 2100 B proizvođača INSTRON	46
Slika 48: Shematski prikaz pozicija na kojima je mjerena mikrotvrdoća	47
Slika 49: Primjer otiska koji ostavlja penetrator u osnovnom materijalu uzorka M	47
Slika 50: Primjer otiska koji ostavlja penetrator u zavoru uzorka M	48
Slika 51: Skica položaja rezanja mehaničkih proba	50
Slika 52: Prikaz izmjerenih mikrotvrdoća za užu cijev	52
Slika 53: Prikaz izmjerenih mikrotvrdoća za širu cijev	52

POPIS TABLICA

Tablica 1 Osnovna svojstva nikla, [1]	2
Tablica 2 Kemijski sastav Nikla 200, %, [9].....	4
Tablica 3 Vrijednosti nekih svojstva Nikla 200, [9].....	5
Tablica 4 Mehanička svojstva Nikla 200, [9].....	5
Tablica 5 Rezultati dvogodišnjeg utjecaja atmosfere na Nikal 200, [9].....	6
Tablica 6 Mehanička svojstva nekih legura nikla [10].....	8
Tablica 7 Niklove legure koje postižu mehanička svojstva legiranjem, [11].....	9
Tablica 8 Kemijski sastavi različitih Monel legura, %, [12].....	11
Tablica 9 Svojstva različitih Monel legura, [13]	11
Tablica 10 Kemijski sastav legure Monel 400, %, [19]	13
Tablica 11 Svojstva Monel 400 legura, [21]	14
Tablica 12 Mehanička svojstva legure Monel 400 za različite proizvodne oblike, [19].....	14
Tablica 13 Mehanička svojstva legure Monel 400 za različita stanja obrade [19].....	15
Tablica 14 Žilavost legure Monel 400, KV [19].....	15
Tablica 15 Kemijski sastav ispitivane legure Monel 400.....	21
Tablica 16 Mehanička svojstva legure Monel 400.....	21
Tablica 17 Kemijski sastav dodatnog materijala dimenzija Ø 1,6x1000 mm	21
Tablica 18 Kemijski sastav dodatnog materijala dimenzija Ø 2,4x1000 mm	22
Tablica 19 Zajamčena mehanička svojstva dodatnog materijala od strane proizvođača pri 20°C.....	22
Tablica 20 Parametri zavarivanja za pojedini prolaz zavarivanja	24
Tablica 21 Parametri brušenja	27
Tablica 22 Parametri poliranja	29
Tablica 23 Rezultati mjerenja tvrdoće pri opterećenju HV 0.2 za uzorak sa manje cijevi.....	48
Tablica 24 Rezultati mjerenja tvrdoće pri opterećenju HV 0.2 za uzorak sa veće cijevi	49
Tablica 25 Izvještaj o mehaničkim svojstvima	50

POPIS OZNAKA

HRB – tvrdoća po Rockwell-u B

HV - tvrdoća po Vickers-u

KV – udarni rad loma po Charpy-u, za epruvetu sa V urezom

$R_{p0,2}$ - konvencionalna granica razvlačenja

Sažetak

U završnom radu provedeno je metalografsko ispitivanje zavarenog spoja niklove legure. Rad je podijeljen u dva dijela, teoretski i eksperimentalni.

U teoretskom dijelu opisani su nikal i njegove legure, osobito Monel 400, njihova svojstva i primjena te metalografski postupak ispitivanja zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu provedena je analiza mikrostrukture dvaju zavarenih spojeva legure Monel 400, izvedena TIG postupkom zavarivanja. Na metalografski pripremljenim uzorcima napravljena je makroskopska i mikroskopska analiza mikrostrukture. Analizirana je mikrostruktura osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavora. Na spomenutim područjima izmjerena je mikrotvrdoća HV 0,2. Provedena su ispitivanja mehaničkih svojstva (vlačna čvrstoća i savijanje). Na temelju analize dobivenih rezultata doneseni su odgovarajući zaključci.

1. Uvod

Legure nikla i bakra, pod trgovačkim imenom Monel legure, javile su se u upotrebi početkom prošlog stoljeća. Dobra mehanička svojstva ovih legura, mogu se dobiti u širokom rasponu, za prilagodbu različitim uvjetima eksploatacije. Ponajprije su ove legure zanimljivije, zbog svoje korozijske postojanosti u različitim medijima. Korozija je znatan čimbenik svjetske krize materijala i energije. Posljedica korozije je smanjenje mase i uporabne vrijednosti materijala, skraćeni vijek trajanja opreme, te snižavanje kvalitete proizvoda. Ulažu se veliki naponi kako bi se za pojedine svrhe odabrao materijal s odgovarajućom korozijskom postojanošću na prisutni korozivni medij. Zahvaljujući svom sastavu, ove legure su otporne na djelovanja različitih korozijskih čimbenika, te su našle svoju primjenu u različitim korozivnim medijima. Prednost ovih legura je i mogućnost spajanja postupkom zavarivanja, što je izrazito bitno za širinu primjene.

2. Nikal

2.1. Svojstva, dobivanje i primjena

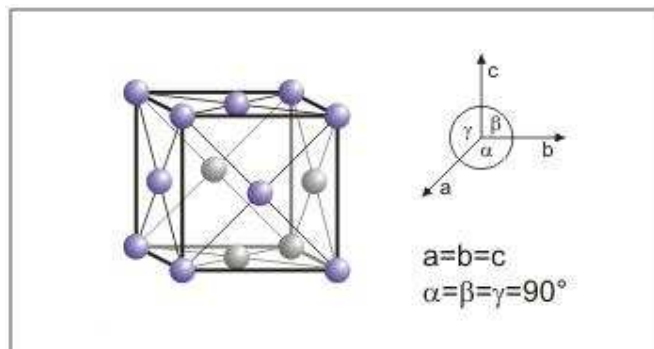
Nikal je element, simbola Ni, i atomskog broja 28. Po svojim mehaničkim i magnetskim svojstvima je sličan željezu kojem je blizak u periodnom sustavu elemenata. Dobra svojstva su mu antikorozivnost, vatrootpornost, čvrstoća na visokoj temperaturi i dobra otpornost puzanju, te dobro provođenje topline i električne energije. Može se, poput željeza koje mu je srodno, lako polirati, kovati, zavarivati, valjati i izvlačiti u žicu. Budući da metalni meteoriti sadržavaju u prosjeku 8 - 9 % nikla, pretpostavlja se da je on jedan od glavnih sastojka Zemljine jezgre. Rude nikla su sulfidne (pentlandit (Fe, Ni)S), silikatne (garnierit) i arsenidne (nikolit (NiAs), te kloantit (NiAs₂)). Tehnički važne rude sadržavaju 1-5 % nikla. Metalurgija nikla u mnogom je slična metalurgiji bakra. Koncentrat dobiven iz rude višestrukim se taljenjem i oksidacijom prevodi najprije u sulfidni kamenac, a onda prženjem u oksid koji se reducira u sirovi nikal. Ovaj se rafinira elektrolizom ili preko karbonila. Najveće rezerve nikla na svijetu se nalaze u Australiji i Novoj Kaledoniji (45 %), a najveći proizvođač nikla je Rusija (petina ukupne proizvodnje). Procjenjuje se da se u svijetu godišnje proizvede 510 000 m³ nikla. Upotreba nikla se može pratiti još od 3500 godina pr.Kr., a prvi puta je izoliran i klasificiran od strane Alexa Fredrika Cronstedta 1751. godine, iako ga je on pogrešno pretpostavio za bakrov mineral. Zbog spore oksidacije na zraku nikal se smatra korozijski postojanim materijalom, i zato se preko 10 % ukupne godišnje proizvodnje nikla koristi za postupke platiniranja. Većina proizvodnje nikla odlazi na niklove legure (oko 60 %), dio na superlegure, a dio za kemijsku primjenu (3 %), kao primjerice katalizator za hidrogenizaciju. Nikal pri sobnoj temperaturi ima feromagnetična svojstva, što ga svrstava u rijetku skupinu od četiri elementa (željezo, kobalt, gadolinium i nikal). Osnovna svojstva nikla prikazana su u tablici 1.

Tablica 1 Osnovna svojstva nikla, [1]

Svojstvo	Vrijednost
Atomski broj	28
Atomska masa	58,71 g/mol
Gustoća	8908 kg/m ³
Talište	1455°C
Vrelište	2913°C
Toplina taljenja	17,48 kJ/mol
Toplina isparavanja	377,5 kJ/mol
Specifični toplinski kapacitet	(25°C) 26,07 J/(mol)(K)

Nikal ima plošno centriranu kubičnu rešetku [FCC], prikazanu na slici 1; odnosno austenitnu strukturu, pa su mu svojstva donekle slična svojstvima austenitnih čelika. Tu strukturu zadržava od sobne temperature sve do tališta pa nije moguće toplinskom obradom promijeniti

tip kristalne građe. Zrno se može usitniti hladnom deformacijom i naknadnom toplinskom obradom. Zahvaljujući austenitnoj strukturi nikal posjeduje dobru istežljivost i zavarljivost.



Slika 1: Plošno centrirana kubična kristalna struktura nikla ($a=352.38 \text{ pm}$) [2]

Korozijska otpornost

Nikal je prilično otporan prema koroziji u raznim medijima. Pri sobnoj temperaturi otporan je na djelovanje atmosferskih plinova, vode, halogenih elemenata i sumpora (na zraku tamni vrlo polako), ali zagrijan reagira kako s halogenim elementima, sumporom i fosforom, tako i s arsenom, selenom i drugim. S kisikom daje niklov(II)-oksid, a zagrijan do crvenog žara s vodenom parom daje niklov(I)-oksid uz oslobađanje vodika. Možemo reći da je nikal postojan u vrućim oksidirajućim plinovima do 1000°C , iako njegova mehanička svojstva slabe nakon 800°C . Praškasti je nikal piroforan i zapali se zagrijavanjem na zraku. Lako upija veće količine plinova (kao CO , H_2). Vrlo je otporan prema lužinama. U neoksidirajućim kiselinama otapa se vrlo sporo, dok ga razrijeđene oksidirajuće kiseline otapaju vrlo brzo. Koncentrirana dušična kiselina pasivizira površinu, ali dugotrajnijim djelovanjem ipak dolazi do postupnog otapanja. U reakcijama nikla s kiselinama stvaraju se soli nikla(II) koje su zelene boje kada su hidratizirane, a isto tako i njihove otopine.

Primjena

Nikal se koristi za razne primjene. Oko 46 % proizvedenog nikla koristi se u proizvodnji niklovičelika (8-12 % Ni), 34 % za ostale legure i superlegure, 14 % za postupke elektrolitiranja, i 6 % za ostale svrhe. Zbog velike otpornosti na koroziju nikal se upotrebljava za izradu opreme za prehrambenu i kemijsku industriju, konstrukcijskih dijelova u brodogradnji, metalnog kovanog novca i posuda te za prekrivanje površina mnogih metala elektrolitičkim niklanjem (aluminija, magnezija i željeza, odnosno čelika). Također, koristi se i za nakit, za izradu pribora za jelo, za žice električnih gitara i dijelove mikrofona. Koristi se i u elektroničkoj industriji, primjerice za dijelove sustava punjivih baterija (NiMH baterije). Upotreba nikla raste godišnje otprilike 4 %, a zanimljivo je da je jedan od najčešće recikliranih materijala.

Na slici 2 prikazane su kovanice nizozemskog novca izrađene od nikla.



Slika 2: Kovanice nizozemskog novca izrađene od nikla [1]

2.2. Legure nikla

Nikal se najviše upotrebljava kao legirajući metal pri proizvodnji nehrđajućih i vatrootpornih čelika, te za dobivanje mnogobrojnih binarnih i višekomponentnih legura, koje se odlikuju antikorozivnim, vatrootpornim, električnim, termoelektričnim i magnetskim svojstvima.

Legure nikla se klasificiraju kao, [4]:

- 1) komercijalno čisti nikal (npr. Nikal 200) – sadrže preko 99 % nikla
- 2) legure nikla i bakra (npr. Monel 400) – sadrže oko 30 % bakra
- 3) legure nikla, kroma i željeza:
 - a) hladno očvrstive – 15-22 % kroma i do 46 % željeza (npr. Incoloy i Hastelloy)
 - b) toplo očvrstive – očvrstive precipitacijskim očvrstnućem (npr. Nimonic)

2.2.1. Nikal 200

Nikal 200 se smatra komercijalno čistim niklom (99,6 %). Ima dobra mehanička svojstva i odličnu korozijsku otpornost u raznim medijima. Također su bitna njegova magnetska svojstva, kao i provođenje topline i struje. Kemijski sastav Nikla 200 dan je u tablici 2, a neka svojstva su dana u tablici 3.

Tablica 2 Kemijski sastav Nikla 200, %, [9]

Element	Maseni udio
Nikal	$\geq 99,0$
Bakar	$\leq 0,25$
Željezo	$\leq 0,40$
Mangan	$\leq 0,35$
Ugljik	$\leq 0,15$
Silicij	$\leq 0,35$
Sumpor	$\leq 0,01$

Tablica 3 Vrijednosti nekih svojstva Nikla 200, [9]

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	8,89 g/cm ³
Temperatura taljenja	1435-1446°C
Specifična toplota	456 J/(kg)(K)
Curieva temperatura	360°C

Nikal 200 je niklova legura s plošno centriranom kubičnom rešetkom. U mikrostrukturi se mogu izlučiti male količine nemetalnih uključaka, uglavnom oksida, koji se ne mogu ukloniti žarenjem. Produženim eksploatiranjem na 425-650°C precipitirati će grafit. Zbog toga se ovu leguru ne preporuča koristiti pri temperaturama u intervalu 315-650°C, nego se tada može koristiti legura Nikal 201. Mehanička svojstva Nikla 200 prikazana su u tablici 4.

Tablica 4 Mehanička svojstva Nikla 200, [9]

Oblik proizvoda	Stanje	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Istezljivost [%]	Tvrdoća [HRB]
Šipka	žareno	380-520	105-210	55-40	45-70
	hladno deformirano	450-760	275-690	35-10	75-98
Ploča	toplo valjano	380-690	140-550	55-35	55-80
	toplo valjano i žareno	380-550	105-275	60-40	45-75
Cijev	žareno	380-520	85-210	60-40	<70
Žica	žareno	380-580	105-345	50-30	-

Otpornost na koroziju

Otpornost na koroziju je glavno gospodarstveno svojstvo nikla. U unutrašnjim prostorima Nikal 200 ostaje sjajan, dok je pri vanjskoj atmosferi brzina korozije izrazito mala i na površini se stvara tanki film, obično sulfata. Brzina korozije raste s porastom koncentracije sumpornog dioksida u atmosferi. Atmosferski utjecaj na koroziju nikla prikazan je u tablici 5.

Tablica 5 Rezultati dvogodišnjeg utjecaja atmosfere na Nikal 200, [9]

Mjesto ispitivanja	Gubitak mase [g]	Brzina korozije [mm/godini]
Kure Beach, NC - luka	0,23	0,0003
Newark, NJ - industrijska zona	1,50	0,0020
Point Reyes, CA - luka	0,13	0,0002
State Colledge, PA - ruralna okolina	0,22	0,0003

Otpornost na koroziji u vodi, destiliranoj i prirodnoj, je odlična. U destiliranoj vodi brzina korozije je manja od 0,0003 mm po godini. U običnoj vodi za kućanstvo brzina je i dalje manja od 0,0005 mm po godini. U morskoj vodi otpornost na koroziju je također odlična, pogotovo pri većim brzinama. Pri manjim brzinama, odnosno pri stajanju, može doći do biološkog zaprljanja koje značajno umanjuje otpornost koroziji.

Nikal 200 korozijski je postojan i u različitim kiselinama, ovisno o koncentraciji. Pri sobnoj temperaturi korozijski je postojan na djelovanje klorovodične kiseline do koncentracije od 30%. To je moguće zahvaljujući produktu korozije nikal-kloridu, koji do tih koncentracija ima malu topljivost. Porastom temperature otpornost na klorovodičnu kiselinu znatno pada. Na fluorovodičnu kiselinu Nikal 200 ima odličnu otpornost i pri višim temperaturama, ali obično se to svojstvo iskorištava na temperaturama do 80°C. U fosfornoj kiselini Nikal 200 nije korozijski postojan zbog nečistoća (fluoridi, razne soli) koje se obično u njoj nalaze i pojačavaju korozivno djelovanje. Na organske kiseline pokazuje dobru otpornost u svim koncentracijama.

Fluor i klor djeluju oksidirajuće u kontaktu s metalima. Nikal 200 u kontaktu s njima, može biti postojan pod određenim uvjetima. Na sobnoj temperaturi stvara fluoridni film, koji ga dovoljno štiti na niskim temperaturama, a pri višim temperaturama ne pruža dovoljnu zaštitu. Također, pri niskim temperaturama Nikal 200 pokazuje otpornost na utjecaj suhog klora.

2.2.2. Ostale legure nikla

Feronikal je legura željeza s dodatkom 24 – 48 % nikla koja se koristi uglavnom u proizvodnji nehrđajućih čelika. Za potrebe proizvodnje navedenih i drugih čelika s visokim sadržajem nikla koristi se gotovo polovica svjetske proizvodnje nikla. U nehrđajućim čelicima nikal se dodaje kao feronikal tako da navedeni čelici sadrže 3,5 do 22 % nikla. Redovito se dodaje i 16 do 26 % kroma. U strukturi čelika nikal stabilizira austenitnu strukturu i poboljšava deformabilnost čelika. Uz krom doprinosi otpornosti na koroziju pri povišenim temperaturama. Dodavanjem nikla do 9 % progresivno se povećava čvrstoća, tvrdoća i žilavost čelika. Također se priređuje legura nikla samo s kromom (80 % Ni i 20 % Cr) pod nazivom Nikrom legura.

U nastavku su navedene najvažnije legure u kojima nikal sudjeluje s dominantnim ili relativno visokim udjelom.

- Duranikal 301 (93,9 % Ni; 4,5 % Al; 0,5 % Ti; 0,15 % C; 0,15 % Fe; 0,05 % Cu) legura je nikla s aluminijem.
- Monel legure (~ 65 % Ni; ~ 32 % Cu; 1,35 % Fe; 0,12 % C) visoke su čvrstoće i antikorozivne na povišenim temperaturama. Koriste se u procesnoj industriji, brodogradnji i u proizvodnji kućanskih uređaja i opreme.
- Magnetske legure:
 - Hipernik (50 % Ni; 50 % Fe)
 - Permalloy (78,5 % Ni; 21,5 % Fe);
 - Perminvar (45 % Ni; 30 % Fe; 25 % Co),
 - Al-Ni-Co (ALNICO) legure
- Nicrom legure s osnovnim sastavom od 80 % Ni i 20 % Cr te s malim dodacima silicija koriste se za izradu otpornih žica raznih grijaćih tijela i pribora za domaćinstvo (bijeli metal).
- Calorit (65 % Ni; 8 % Mn; 12 % Cr; 15 % Fe) se također koristi za izradu grijaćih tijela.
- Cromel (35-60 % Ni; 16-19 % Cr; a ostalo je Fe) ima veliki električni otpor i ne korodira pa se upotrebljava za izradu otpornika i termoelemenata.
- Elinvar (34 % Ni; 57 % Fe; 4 % Cr; 2 % W) ima veoma mali koeficijent rastezanja pa se upotrebljava za izradu opruga mehaničkih satova i za precizne instrumente.
- Invar (36 % Ni i 64 % Fe) ima također mali temperaturni koeficijent rastezanja pa se upotrebljava u radio-tehnici, mjernoj tehnici za izradu termostata i sl.
- Hastelloy (45 % Ni; 22 % Cr i Fe; 9 % Mo s malim dodacima Co i W) legure su izuzetno otporne na djelovanje sumporne, klorovodične i drugih kiselina pa se primjenjuju u kemijskoj procesnoj tehnici koja koristi navedene kiseline.
- Incoloy (~35 % Ni; ~20 % Cr; ~45 % Fe; 0,75 % Cu; 0,10 % C) visoko su vatrostalne legure koje se koriste za izradu posuda za taljenje i dijelova visokotemperaturnih peći. Koriste se pri visokim temperaturama gdje se traži visoka čvrstoća, otpornost na oksidaciju i pougljičavanje. Krom osigurava otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju i opću koroziju. Nikal je zaslužan za austenitnu mikrostrukturu koja osigurava dobru istezljivost i na visokim temperaturama. Također povećava otpornost prema općoj i napetosnoj koroziji.
- Inconel (50-80 % Ni; 17-24 % Cr; 5-10 % Fe) legure razvijene su za rad na visokim temperaturama u oksidirajućem okruženju. Posjeduje visoku čvrstoću i korozijsku postojanost

uz nepromijenjenu žilavost u širokom rasponu temperatura. Otporne su na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju. Koriste se za komponente u nuklearnim reaktorima, elektroničke komponente, cijevi izmjenjivača topline, dijelove plinskih turbina itd.

- Metalno-keramički kompoziti (MCC) sadrže 30-70 % Ni, a ostatak su karbidi titana, volframa i kroma raspršeni u obliku sitnih kristala u kristalnoj rešetci nikla. Bitno povećavaju čvrstoću, žilavost i vatrostalnost nikla. Upotrebljavaju se za izradu dijelova izloženih velikim dinamičkim naprezanjima pri visokim temperaturama (npr. u plinskim turbinama i reaktorima), kao konstrukcijski materijali u kemijskoj industriji, za izradu rotacijskih dijelova crpki itd.

- Platinit (48 % Ni i 52 % Fe) legura je koja ima koeficijent temperaturnog rastezanja jednak staklu pa se i koristi za spojeve metala sa staklom i kao zamjena za platinu u elektroindustriji.

Istraživanja materijala za američku vojnu industriju su dovela do otkrića izuzetne legure nikla i titana, pod nazivom nitinol. Ta legura ima svojstvo pamćenja prethodnog oblika (koji je imala ispod određene kritične temperature). Osnovni uvijet svojstva prisjetljivosti oblika je reverzibilnost martenzitne pretvorbe. Mikrostruktura slitina sa efektom prisjetljivosti oblika mora biti monofazna, a kod ove legure je austenitna faza stabilna i kristalografski uređena sve do temperature tališta. Nitinol legura je predviđena za izradu specijalnih obujmica i učvršćivača koji bi se pothlađeni lako montirali, a postigavši ponovno svoju radnu temperaturu (iznadkritičnu) skupili i učvrstili predviđene elemente.

U tablici 6 prikazana su određena mehanička svojstva nekih niklovih legura.

Tablica 6 Mehanička svojstva nekih legura nikla [10]

Naziv legure	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Granica razvlačenja [N/mm ²]	Istezljivost [%]	Tvrdoća [HV]
Nickel 200	469	186	47	171
Monel 400	565	269	45	137
Inconel 600	683	310	43	160
Inconel 601	634	276	56	137
Inconel 625	896	483	50	183
Incoloy 800	586	290	45	155
Incoloy 800H	552	241	45	145
Incoloy 800HT	552	241	45	145
Incoloy 803	614	317	47	143
Incoloy 825	690	310	45	155
INCO C-276	793	345	60	188
INCO 020	683	414	35	148

Sa stajališta postizanja čvrstoće Ni-legure možemo podijeliti u dvije grupe:

- 1) Legure koje postižu mehanička svojstva legiranjem elementima koji se rastvaraju u krutom stanju tvoreći s Ni supstitucijske kristale mješance,
- 2) Legure koje postižu mehanička svojstva naknadnom toplinskom obradom – dozrijevanjem.

U prvu skupinu se ubraja upravo Monel 400 legura, kao što se vidi iz tablice 7.

Tablica 7 Niklove legure koje postižu mehanička svojstva legiranjem, [11]

Tip	USA Grupa	Primjer sustava	Naziv
Ni 99-99,8	200	99,5 Ni	NIKAL
Ni-Cu	400	66,5 Ni 31,5 Cu	MONEL 400
Ni-Cr	600	76 Ni 16 Cr 8 Fe	INCONEL 600
Ni-Cr-Fe	800	32,5 Ni 21 Cr 46 Fe	INCOLOY 800
Ni-Mo		61 Ni 28 Mo 2.5 Co	HASTELLOY B
Ni-Cr-Mo		54 Ni 15,5 Cr 16 Mo	HASTELLOY C
Ni-Si		82 Ni 9 Si 3 Cu	HASTELLOY D

3. Monel

Monel je trgovački naziv skupine niklovihi legura, koje sadrže nikal te bakar, uz dodatke željeza i nekih drugih elemenata u malim količinama. Bakar i nikal se u periodnom sustavu elemenata nalaze jedan pored drugog, s atomskim brojevima 28 i 29, te su potpuno međusobno topivi u tekućem i čvrstom stanju. Legure ta dva elementa kristaliziraju u širokom rasponu koncentracija tvoreći FCC rešetku. Monel leguru prvi je otkrio Robert Crooks Stanley 1901. godine, tijekom rada za International Nickel Company (INCO), po čijem je predsjedniku legura i dobila svoje ime (Ambrose Monell). Počevši proizvoditi nove legure, u omjeru 70 % nikla i 30 % bakra, primjetili su mnoga zanimljiva svojstva: legura je bila sjajnija od nikla, čvršća od čelika, te imala veću otpornost koroziji u morskoj vodi i sumpornoj kiselini od bakra. Već 1907. godine prodano je oko 250,000 kilograma proizvoda izrađenih od Monela. U početku su se javljali problemi s lijevanjem Monela, no uspješno su riješeni, te su se ubrzo počeli lijevati brodski propeleri (primjer američki vojni brod North Dakota napravljen 1907. god.). Propeler s tri lopatice, lijevane u jednom komadu, bio je promjera četiri metra te težio 6,800 kilograma. Nakon toga je uslijedila ekspanzija Monela kao materijala za primjenu u brodogradnji. U 1. svj. ratu korišten je za brodove, kao materijal za hladnjake motora zrakoplova, te za identifikacijske pločice vojnika. U građevini je Monel također brzo našao primjenu, poglavito za krovista. Pennsylvania, željeznička postaja u New Yorku, je prva zgrada na kojoj je u tu svrhu primjenjen Monel 1909. godine. Zgrada je srušena 1990. godine, no po brzini korozije procjenjuje se da je krovšte na njoj moglo trajati tristo godina. Zanimljivo je da je narudžba Monela za krovšte te zgrade, do danas najveća pojedinačna narudžba Monela (119,478 kg). I danas se Monel koristi za tu primjenu, primjer čega je zgrada Great Lakes Science Center u Cleveland-u, koja je pokrivena pločama Monela. Već 20-ih godina prošlog stoljeća Monel je bio korišten za izradu kuhinjske opreme (sudoperi, spremnici za grijanje tople vode, lonci za kuhanje itd.) i opreme u postrojenjima za pripremu hrane, zbog odlične otpornosti na kiseline iz hrane, poglavito iz voća i povrća. Također je u navedenim uvjetima dolazila do izražaja dobra otpornost napetosnoj koroziji u kloridima i jednostavnost steriliziranja. Potonje je činilo Monel primamljivim konstrukcijskim materijalom za medicinsku opremu. Također se počeo koristiti kao dekorativni materijal u interijerima građevina, primjer čega je Detroit's Guardian Building. Uslijedile su i primjene Monela za prevlačenje ugljičnih čelika čime se ekonomski isplativo moglo pružiti materijalu korozijsku otpornost, dok je čelik kao osnovni materijal bio nositelj potrebnih mehaničkih svojstava. Zahvaljujući otpornosti na razne medije, Monel je našao veliku primjenu u kemijskoj industriji. Od njega se izrađuju mlaznice, ventili i cijevi u postrojenjima alkilacije flourovodika, što je bilo izrazito bitno tijekom 2. svj. rata kada se to zahtjevalo kao dodatak gorivu zrakoplova. Otpornost prema djelovanju flourovodika i floura dovelo je do primjene Monela u procesima rafinacije urana u nuklearnim postrojenjima. Zbog otpornosti na soli, našao je primjenu u uređajima za proizvodnju soli i ostalim uređajima za isparavanje, kao i za spremnike, gdje je bitno da korozijski produkti ne ulaze u sadržaj spremnika. U automobilskoj industriji Monel je također brzo prepoznat kao značajan materijal, posebno za izradu ventila. U izradi glazbenih instrumenata Monel se koristi za izradu žica električnih gitara, te ventila za trube. Pri restauriranju Kipa Slobode, više od 65,000 vijaka izrađenih od Monela je postavljeno umjesto originalnih koji su podlegli koroziji.

Nekoliko različitih legura spadaju pod naziv Monel, a označuju se kao Monel legure: 400, 401, R-405, 450, K-500, 404, itd. Kemijski sastav različitih Monel legura prikazan je u tablici 8, a svojstva u tablici 9.

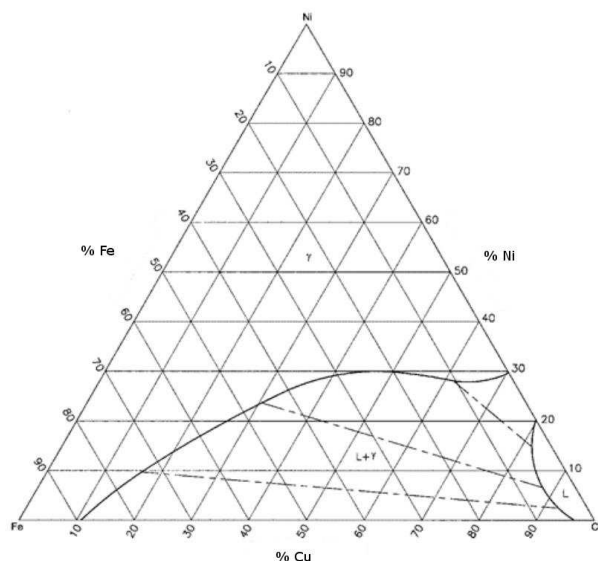
Tablica 8 Kemijski sastavi različitih Monel legura, %, [12]

Trgovačka oznaka	C	Ni	Al	Cu	Fe	Ostali elementi
Monel 400	0,12	65	-	32	1,5	Mn 1,0
Monel 401	0,10	43	-	53	0,75	Si 0,25 Mn 2,25
Monel K 500	0,13	64	2,8	30	1,0	Mn 0,8
Monel R 405	0,15	66	-	31	1,2	Mn 1,0 S 0,04

Tablica 9 Svojstva različitih Monel legura, [13]

Naziv legure	Monel 400	Monel 401	Monel K-500	Monel R-405
Gustoća [g/cm ³]	8,8	8,89	8,44	8,8
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	550	441	1100	550
Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	240	134	790	240
Istezljivost pri puknuću [%]	48	51	25	40
Curieva temperatura [°C]	35	-196	-65	35
Specifični toplinski kapacitet [J/(g)(°C)]	0,427	-	0,419	0,427
Toplinska provodljivost [W/(m)(K)]	21,8	19,2	17,5	21,8

Na slici 3 prikazan je izotermni dijagram Cu-Fe-Ni pri 1200°C.



Slika 3: Trojni izotermni dijagram Cu-Fe-Ni pri 1200°C, [14]

Monel legure imaju visoku otpornost na koroziju, posebno na djelovanje slane vode i određenih kiselina. Otpornost na erozijsku koroziju im je dobra čak i pri velikim brzinama strujanja. U odnosu na čelike su teže obradive, te se moraju obrađivati pri nižim brzinama kako bi se smanjila opasnost od povišenja tvrdoće legure pri obradi. Dodacima aluminija i titana se postiže veća čvrstoća uz istu korozijsku otpornost, primjer čega je legura K-500. Monel K-500 je toplinski očvrstiva legura, te joj se pravilnom toplinskom obradom može postići visoka čvrstoća i tvrdoća. Ima izvrsnu otpornost na koroziju i odlična mehanička svojstva u širokom temperaturnom rasponu. Odlikuje se povišenom čvrstoćom i tvrdoćom do 650°C, te zadržava visoku čvrstoću, žilavost i istezljivost do -250°C. Koristi se kod vojnih brodova s obzirom da je nemagnetična, te ne aktivira podvodne mine. Zbog izrazite otpornosti koroziji koristi se kod off-shore platformi, i kod opreme za traženje i istraživanje naftnih polja. Koristi se još i za dijelove pumpi, kirurške noževe i instrumente, elektroničku opremu, opruge itd. Za primjenu u elektronici, razvijen je Monel 474, koji svoju magnetsku permeabilnost ne gubi postupcima obrade.

Zbog zadržavanja svojstva pri visokim temperaturama Moneli se koriste u zrakoplovnoj industriji, gdje to dolazi do izražaja zbog topline koju stvara aerodinamičko trenje. Poznati primjer toga je primjena kod eksperimentalne letjelice North American X-15 tijekom 1960. godine, slika 4.



Slika 4: North American X-15 u letu [15]

Zbog izvrsne korozijske otpornosti, Moneli se često primjenjuju kao materijal za cijevi, ventile, spremnike za goriva i vodu, propelere itd. U brodogradnji, kod korištenja Monela za trup brodova, mora ga se dobro izolirati od ostalih metala, kao primjerica čelika, zbog pojave galvanske korozije. Zbog otpornosti na kisik i kiseline, Monel nalazi i primjenu u kemijskoj industriji. Posebno je bitna otpornost na djelovanje fluoridne kiseline, zbog čega je Monel našao primjenu i u postrojenjima za obogaćivanje urana kao što je Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant.

Većina Monel legura su dobro zavarljive. Plinsko zavarivanje je bilo prošireno tijekom 20-ih godina prošlog stoljeća. Neke vrste Monela su se proizvodile kao dodatni materijal pri zavarivanju. Za zavarivanje većine lijevanih i kovanih Monela korišten je Monel Filler Metal 40, a za one sa manjim udjelom nikla Monel Filler Metal 43. U drugoj polovici prošlog stoljeća počeli su se koristiti TIG i MIG postupci zavarivanja, za koje je razvijen Monel Filler Metal 60 koji je u upotrebi i dan danas. Za spajanje Monela razvijene su mnogobrojne elektrode, kao primjerice Monel Welding Electrodes 130, 140, 180 i 190.

3.1. Monel 400

Monel 400 je legura koja može očvrnuti samo hladnom deformacijom. Ima visoku čvrstoću u širokom temperaturnom intervalu i odličnu korozijsku otpornost u raznim medijima.

Značajna svojstva:

- može se očvrnuti samo hladnim preoblikovanjem
- ima visoku tvrdoću i čvrstoću u širokom rasponu temperatura
- odlična otpornost prema koroziji
- odlična otpornost na utjecaj morske vode i pare pri povišenim temperaturama
- odlična otpornost na djelovanje kiselina na bazi klora i natrija
- odlična otpornost prema abrazivnim medijima

Kemijski sastav je prikazan u tablici 10.

Tablica 10 Kemijski sastav legure Monel 400, %, [19]

Element	Ni	Cu	Fe	Mn	C	S	Si
Maseni udjel	63	28,0-34,0	≤2,5	≤2,0	≤0,3	≤0,024	≤0,5

Monel 400 se može veoma lako proizvoditi, tj. uz pravilnu kontrolu toplog i hladnog preoblikovanja se dobivaju legure širokog raspona mehaničkih svojstava za prilagodbu različitim uvjetima eksploatacije. Toplo oblikovanje izvodi se na temperaturama između 650°C i 1200°C. Toplim oblikovanjem na nižim temperaturama se postižu bolja mehanička svojstva i sitnija zrna. Produljeno držanje na visokim temperaturama je štetno za materijal. Za ovaj materijal moguća je primjena gotovo svih postupaka hladnog preoblikovanja. Prije svake operacije preoblikovanja mora se obratiti pažnja na prilagodbu parametara za takav proces, ovisno o svojstvima koja se žele postići. Bez obzira radi li se o hladnom ili toplom preoblikovanju mora se napraviti toplinska predobrada kako bi se dobila optimalna kombinacija tvrdoće i duktilnosti. Žarenjem se legura može potpuno popustiti, a vrijeme i temperatura koji su potrebni ovise o stupnju prethodnog preoblikovanja. Monel 400 dolazi u nekoliko proizvodnih oblika, najčešće kao žica, šipka, ploča, i cijev. Pri obradi Monel legure preporuča se koristiti brzorezne čelike platirane s kromom.

Monel 400 legura ima široku primjenu, posebno u kemijskoj industriji i za dijelove koji su izloženi djelovanju korozivskih kapljevina, posebno morske vode. Tipični primjeri su ventili, dijelovi pumpi, osovine, vratila, opruge, spremnici goriva i vode, cjevovodi, i izmjenjivači topline. U kemijskoj industriji koristi se kod proizvodnje sumporne kiseline, kod procesa koji uključuju klorovodičnu i fluorovodičnu kiselinu, te kod proizvodnje masnih kiselina. U brodogradnji se koristi za izradu propelera i osovine. U industriji prerade i vađenja nafte i plina se koristi kao materijal za ventile, cijevi, spone itd. Zbog dobrih toplinskih svojstva koristi se kao materijal za izmjenjivače topline.

Tipična svojstva Monel 400 legure su prikazana u tablici 11.

Tablica 11 Svojstva Monel 400 legura, [21]

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	8,8 g/cm ³
Temperatura taljenja	1350°C
Modul krutosti	65,3 kN/mm ²
Modul elastičnosti	105-120 kN/mm ²
Curieva temperatura	21-49°C

Mehanička svojstva:

Monel 400 ima odlična mehanička svojstva. Leguru odlikuje visoka čvrstoća i žilavost. Porastom temperature čvrstoća i tvrdoća rastu sa malim smanjenjem žilavosti i otpornosti na udarce. Legura nema prelaza iz žilavog u krhko stanje čak i kada se hladi tekućim dušikom, što je razlikuje od mnogih metalnih materijala koji su pri niskim temperaturama krhki. Tvrdoća ovisi o načinu proizvodnje i obliku dobivenog proizvoda, a kreće se od 60 do 100 *HRB*. Neka mehanička svojstva prikazana su u tablicama 12 i 13.

Tablica 12 Mehanička svojstva legure Monel 400 za različite proizvodne oblike, [19]

Oblik proizvoda	Stanje	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Istezljivost [%]	Tvrdoća [<i>HRB</i>]
Šipka	žareno	517-620	172-345	60-35	60-80
	popušteno	579-827	379-690	40-22	80-20C
Ploča	toplo valjano	517-655	276-517	45-30	70-96
	toplo valjano i žareno	482-586	193-345	50-35	60-76
Cijev	žareno	482-586	172-310	45-30	<75
Žica	žareno	482-655	207-379	45-25	-

Tablica 13 Mehanička svojstva legure Monel 400 za različita stanja obrade [19]

Stanje	Temperatura [°C]	Vlačna čvrstoća [N/mm²]	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [N/mm²]	Produljenje [%]	Suženje područja [%]
Hladno deformirano	sobna	716	646	19,0	71,0
	-79	819	695	21,8	70,2
	sobna*	713	643	17,3	72,5
Kovano	21	634	462	31,0	72,7
	-183	884	631	44,5	71,8
	-253	979	665	38,5	61,0
Žareno	21	542	216	51,5	75,0
	-183	795	341	49,5	73,9

(* nakon držanja na temperaturi -79 °C)

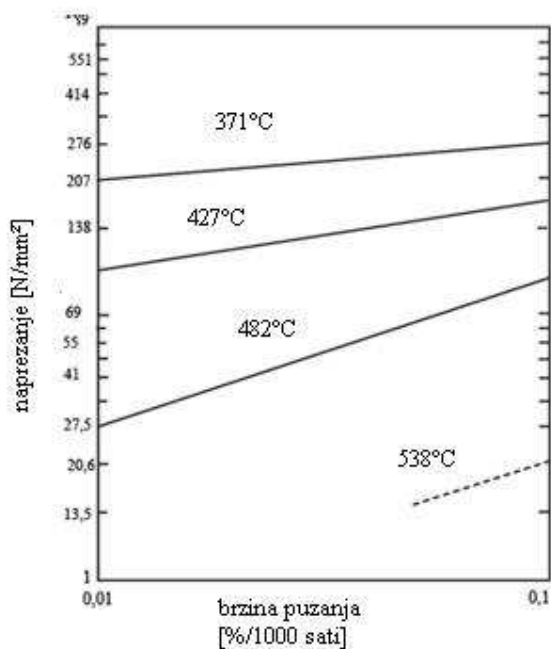
Monel 400 ima visoku žilavost pri širokom rasponu temperatura, i blagi pad žilavosti pri hlađenju do vrlo niskih temperatura.

Tablica 14 Žilavost legure Monel 400, KV [19]

Stanje	Žilavost KV, [J]			
	24°C	-29°C	-80°C	-190°C
Toplo valjano	297	-	289	266
Hladno vučeno, žareno	293	287	297	287
Zavareno	106	-	-	99

U tablici 14 se vidi žilavost legure Monel 400 pri niskim temperaturama postignutim hlađenjem u tekućem dušiku. Nakon ispitivanja nisu pronađeni nikakvi pokazatelji krhkih pukotina, kao niti značajna količina anizotropije.

Monel se može koristiti u oksidirajućim atmosferama na visokim temperaturama. Na slici 5 prikazana su svojstva puzanja toplo valjanog monela.



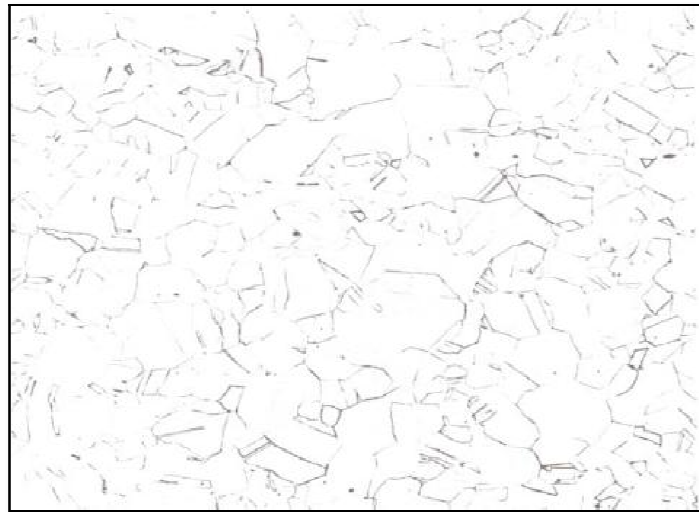
Slika 5: Otpornost na puzanje toplo valjanog Monela 400, [19]

Korozijska postojanost:

Monel 400 ima bolju otpornost koroziji nego nikal, i bolju otpornost oksidaciji nego bakar. Jedna od najbitnijih karakteristika je otpornost na nastajanje pukotina uzrokovanih napetosnom korozijom. Visoko su otporne na morsku vodu i pri velikim brzinama strujanja (otpornost na kavitacijsku i erozijsku koroziju). Legura je otporna na mnoge kiseline uključujući sumpornu, klorovodičnu i fluorovodičnu (otpornost do tališta), te na gotovo sve alkalije. Bolju otpornost na fluorovodičnu kiselinu ima samo srebro. Ima izrazitu otpornost na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju. Monel 400 se koristi u dodiru sa sumpornom kiselinom pod reducirajućim uvjetima. U praksi se legura pokazala kao zadovoljavajuća čak i u 80 %-tnoj sumpornoj kiselini pri sobnoj temperaturi, dok se pri povišenim temperaturama može koristiti do 65 % koncentracije. Povećanje brzine relativnog gibanja između legure i kapljevine povisuje brzinu korozije, posebno ukoliko se u kapljevini nalaze abrazivne čestice. Prednost Monela 400 je što je otporan na nastajanje pukotina izazvanih napetosnom korozijom u sumpornoj kiselini. Samo u žarenom stanju ima korozijsku otpornost na živu i živine soli. Legura nije otporna na nitridnu kiselinu.

Mikrostruktura

Monel 400 je čvrsta binarna legura. Obzirom da su nikal i bakar međusobno potpuno topivi u svim stanjima, radi se o monofaznim legurama, s plošno centriranom kubičnom rešetkom [FCC]. U nenagriženom stanju, polirani uzorak prikazat će samo nasumično disperzirane nemetalne uključke. Mikrostruktura Monela 400 u nagriženom stanju prikazana je na slici 6.



Slika 6: Tipična mikrostruktura hladno vučene šipke legure Monel 400, [19]

4. Metalografsko ispitivanje zavarenog spoja

Prvenstvena zadaća kontrole i ispitivanja kvalitete zavarenog spoja jest stvaranje uvjeta za besprijekorno izvođenje zavarenog spoja. Ispitivanje, za razliku od kontrole, provode uglavnom organizirani laboratoriji ili institucije koje se bave temeljitijim proučavanjem fenomena vezanih uz ponašanje materijala i razvoja tehnologije zavarivanja.

Za jednostavnije dokazivanje kvalitete zavarenog spoja i manje složene analize koriste se, najčešće, tri skupine ispitivanja:

- 1) Mehanička ispitivanja
- 2) Kemijska analiza
- 3) Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja su jedan od postupaka kontrole zavarenog spoja. Izvode se nakon završenog zavarivanja te dokazuju kvalitetu izvedenog posla. Za metalografsku analizu potreban je kvalitetno pripremljen uzorak, svjetlosni mikroskop te znanje i iskustvo. Metalografska ispitivanja izvode se na dvije vrste za to pripremljenih uzoraka: makroizbrusku i mikroizbrusku. Za analizu zavarenih spojeva ovi se uzorci izrađuju iz punog presjeka spoja: izrezivanjem, ulijevanjem u masu, brušenjem, poliranjem te nagrizanjem površine. Pripremljeni uzorci se analiziraju vizualnim pregledom (makroizbrusak) i pomoću mikroskopa (mikroizbrusak), povećanjima od nekoliko do više od stotinu tisuća puta. Sve što je vezano uz makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva metalnih materijala propisuje norma HRN EN 1321. Ta norma propisuje način pripreme uzoraka, postupak ispitivanja te glavni cilj ispitivanja. Makroskopskom i mikroskopskom analizom otkrivaju se makroskopske i mikroskopske značajke zavarenog spoja, najčešće uzetog iz ravnine okomite na smjer zavarivanja.

Značajke koje se vrednuju:

- tople pukotine
- hladne pukotine
- uzdužne pukotine
- šupljine, pore
- uključci
- nedovoljni provar
- geometrijski oblik
- zona utjecaja topline
- slojevi i prolazi
- granice zrna
- struktura zrna
- solidifikacija strukture
- priprema zavara
- usmjerenost strukture
- segregacije
- precipitati

Izvještaj o obavljenom ispitivanju mora sadržavati:

- opis ispitivanja,
- lokaciju i orijentaciju ispitnog uzorka i ispitne površine,
- postupak i proceduru zavarivanja,
- vrstu i tip nagrivanja,
- opis ispitivane površine,
- fotografije, skice i iznos povećanja.

Metalografska ispitivanja su nezaobilazna u svakom ozbiljnijem pristupu analize utjecajnih čimbenika u zavarivanju, a posebno su učinkovita u području istraživanja i potvrđivanja pojava u razdoblju eksploatacije zavarenog spoja.

5. Eksperimentalni dio

5.1. Cilj rada i provođenja ispitivanja

Pri zavarivanju metala, zbog velikog unosa topline može doći do promjene mikrostrukture osnovnog materijala. To može uzrokovati promjenu mehaničkih svojstva i korozijske postojanosti, osobito u zoni utjecaja topline i metalu zavara. Zbog toga zavareni spoj, kao osjetljivi dio konstrukcije prolazi posebna ispitivanja. Metalografska ispitivanja uključuju makroskopsku i mikroskopsku analizu na uzorcima punog presjeka spoja koja se pripremaju izrezivanjem, brušenjem i poliranjem, te nagrivanjem površine.

U radu je potrebno:

- opisati osnovni materijal i primjenjeni postupak zavarivanja Ni-Cu legure,
- pripremiti uzorke za makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje,
- vizualno analizirati zavar (makroskopski),
- napraviti kvalitativnu i kvantitativnu analizu zavarenog spoja.

5.2. Materijal za ispitivanje

Sva ispitivanja provedena su na leguri Monel 400. Ispitni uzorci izrezani su iz dviju cijevi, prikazanih na slici 7. Vanjski promjer uže cijevi bio je 88,9 mm, a debljina stijenke 5,49 mm. Šira cijev je imala vanjski promjer 169 mm i debljinu stijenke 8 mm.



Slika 7: Uža cijev Monela 400 (lijevo), i šira cijev (desno)

5.2.1. Osnovni materijal

U tablici 15 naveden je kemijski sastav osnovnog materijala cijevi zajamčen od proizvođača.

Tablica 15 Kemijski sastav ispitivane legure Monel 400

Maseni udio pojedinih elemenata, [%]								
C	Fe	S	Si	Cu	Ni	Al	Co	Ostatak
0,13	1,65	0,002	0,19	32,66	64,23	0,04	0,03	1,068

U tablici 16 su navedena mehanička svojstva osnovnog materijala, zajamčena od strane proizvođača.

Tablica 16 Mehanička svojstva legure Monel 400

Vlačna čvrstoća, [N/mm ²]	555
Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	219
Istezljivost [%]	46,2
Tvrdoća [HRB]	70,4

5.2.2. Dodatni materijal

Pri zavarivanju cijevi korišten je dodatni materijal trgovačkog naziva Bohler NIBAS 400-IG, dimenzija Ø 1,6 x 1000 mm, te dimenzija Ø 2,40 x 1000 mm. U tablicama 17 i 18 je prikazan kemijski sastav dodatnog materijala zajamčen od proizvođača, a mehanička svojstva su prikazana u tablici 19.

Tablica 17 Kemijski sastav dodatnog materijala dimenzija Ø 1,6 x 1000 mm

Maseni udio pojedinih elemenata, [%]									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Ti	Al	Fe
0,015	0,02	3,42	0,004	0,002	63,40	29,61	2,35	0,10	0,90

Tablica 18 Kemijski sastav dodatnog materijala dimenzija Ø 2,4 x 1000 mm

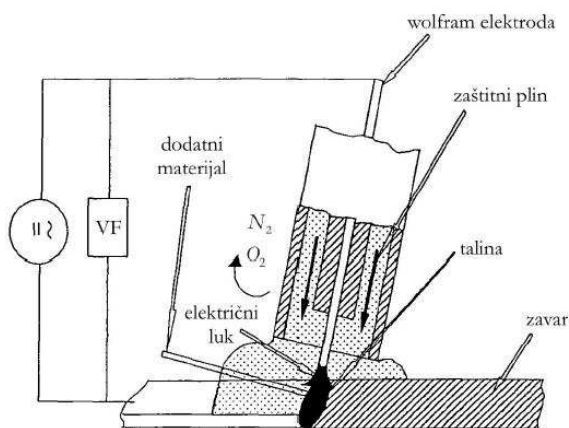
Maseni udio pojedinih elemenata, [%]									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Ti	Al	Fe
0,010	0,10	3,20	0,002	0,002	64,50	28,80	2,30	0,10	0,90

Tablica 19 Zajamčena mehanička svojstva dodatnog materijala od strane proizvođača pri 20°C

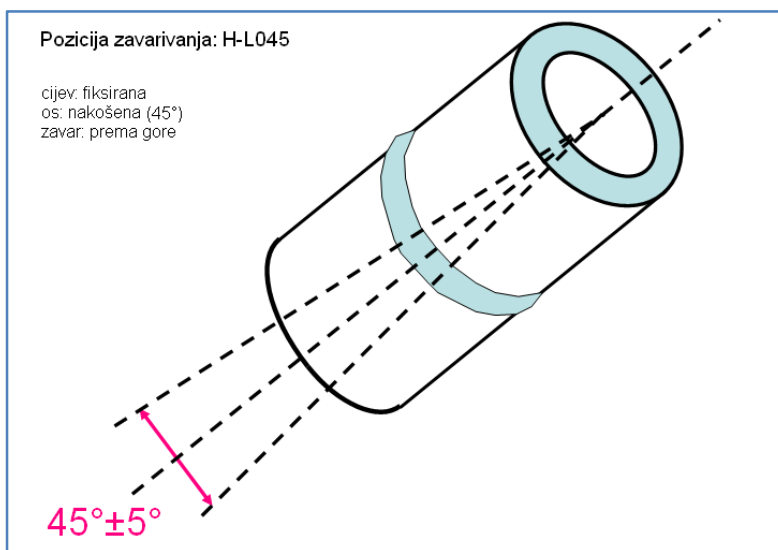
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	500
Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	300
Istezljivost [%]	35
Žilavost KV [J]	150

5.2.3. Zavareni spoj

Postupak zavarivanja izvršen je TIG (GTAW) postupkom, shematski prikazanim na slici 8. Tip spoja je sučeoni V spoj, a pozicija zavarivanja H-L045, prikazana na slici 9. Način pripreme spoja i čišćenja je uključivao strojni, mehanički i kemijski postupak. Kao zaštitni plin tijekom postupka se koristio argon čija je brzina protoka bila 10-15 l/min.

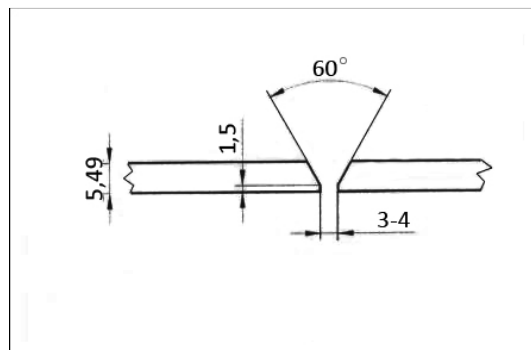


Slika 8: Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja, [21]

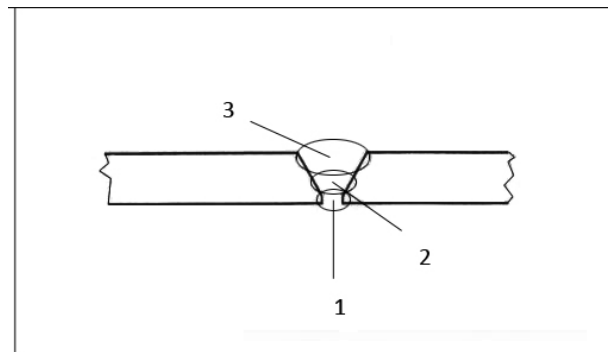


Slika 9: Pozicija zavarivanja H-L045

Na slici 10 je prikazan oblik pripremljenog spoja, a na slici 11 se vidi redoslijed prolaza zavarivanja.



Slika 10: Priprema spoja



Slika 11: Redoslijed prolaza

U tablici 20 navedeni su parametri zavarivanja za pojedine prolaze prikazane u slici 11.

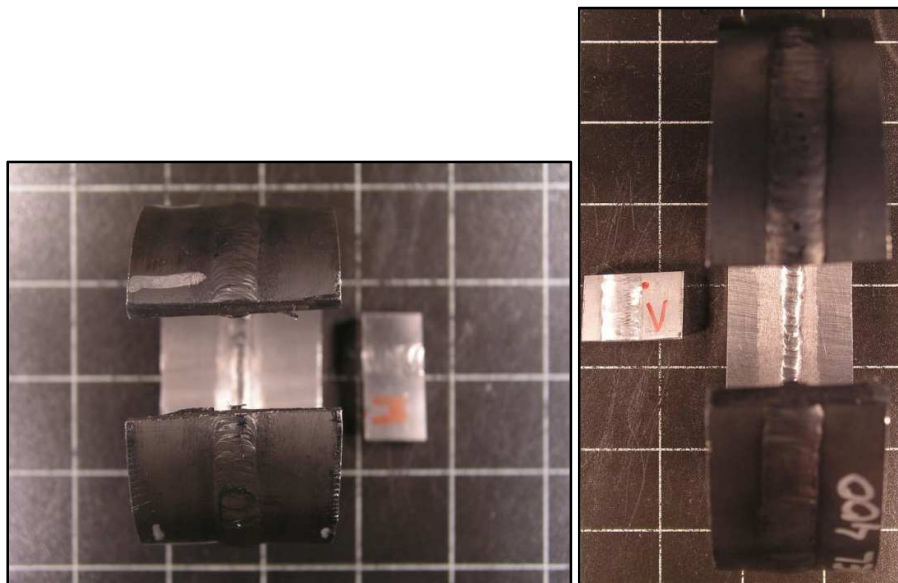
Tablica 20 Parametri zavarivanja za pojedini prolaz zavarivanja

Prolaz	Postupak	Promjer dodatnog materijala [mm]	Vrsta dodatnog materijala	Struja [A]	Vrsta struje, polaritet
1	TIG	1,6	Puna žica	72-95	=, (-)
2	TIG	2,4	Puna žica	90	=, (-)
3	TIG	2,4	Puna žica	98	=, (-)

5.3. Priprema uzoraka

Izrezivanje

Uzorci za svjetlosnu mikroskopiju izrezani su prvo ručnom pilom iz prstena cijevi, što je prikazano na slici 12. Uzorak iz uže cijevi, (M u daljnjem tekstu), lijevo na slici; te uzorak iz šire cijevi, (V u daljnjem tekstu), desno na slici.



Slika 12: Izrezani uzorci iz prstena cijevi; lijevo – uža cijev, desno – šira cijev

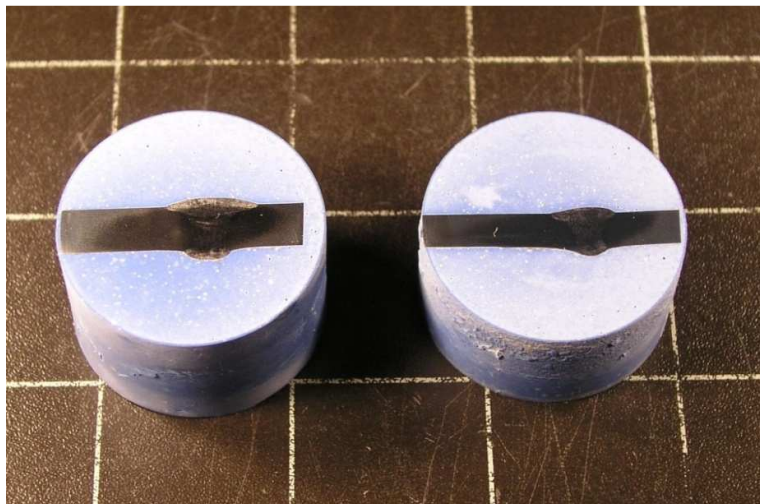
Nakon toga uzorci su izrezani na konačni oblik na laboratorijskoj strojnoj rezalici Accutom-2 proizvođača Struers, prikazanoj na slici 13. Za rezanje se koristila dijamantna ploča promjera 127 mm i debljine 0,4 mm. Tijekom rezanja za hlađenje se koristila voda.



Slika 13: Rezalica Struers Accutom-2

Zalijevanje

Zbog lakše daljnje manipulacije i boljih rezultata analize uzorci su zaliveni u smjesu VariDur 3000, sastavljenu od praškastog i tekućeg dijela, koji se miješaju u omjeru 2:1. Uzorci zaliveni u masu i spremni za daljnju pripremu prikazani su na slici 14.



Slika 14: Uzorci zaliveni u masu

Brušenje

Brušenje je izvedeno na uređaju Buehler: Phoenix Alpha na slici 15.



Slika 15: Uređaj za brušenje Buehler: Phoenix Alpha

Brušenje je izvedeno u pet stupnjeva, a parametri svakog stupnja su prikazani u tablici 21. Tijekom postupka brušenja za hlađenje se koristila voda, kako nebi došlo do zagrijavanja uzoraka i promjene mikrostrukture. Nakon svakog stupnja brušenja uzorci su isprani u vodi kako bi se maknule eventualne nečistoće zaostale od brusnog papira. Pri svakom slijedećem stupnju brušenja uzorci su zakretani za 90° u odnosu na prethodni stupanj, kako bi se što bolje otklonili tragovi prethodnog stupnja brušenja.

Tablica 21 Parametri brušenja

STUPANJ	I	II	III	IV	V
PODLOGA	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir
ABRAZIV	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
VELIČINA ZRNA	P320	P600	P1200	P2500	P4000
SREDSTVO ZA HLAĐENJE	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda
BROJ OKRETAJA [o/min]	300	300	300	300	300
SILA [N]	ručno	ručno	ručno	ručno	ručno
VRIJEME [min]	*	**	**	**	**

(* do poravnanja, ** dok se ne otklone tragovi prethodnog stupnja)

Nakon brušenja uzorci su očišćeni u ultrazvučnoj čistilici Pro'sKit SS-802 u trajanju od tri minute. Uzorak je u čistilici bio uronjen u vodu. Na slici 16, prikazana je ultrazvučna čistilica s uzorcima uronjenim u vodu.



Slika 16: Uzorci u ultrazvučnoj čistilici Pro'sKit SS-802

Poliranje

Poliranje je izvedeno na uređaju Struers DAP-V, prikazanom na slici 17, uz korištenje lubrikanta DP-Lubricant Blue kao sredstva za hlađenje, i dijamantne paste MetaDi II (Diamond polishing Compound, proizvođač Buehler).

Parametri poliranja prikazani su u tablici 22.



Slika 17: Uređaj za brušenje i poliranje (Struers DAP-V)

Tablica 22 Parametri poliranja

PODLOGA	OP-Chem
ABRAZIVNA ČESTICA	dijamant
FINOĆA	1 μm
SREDSTVO ZA HLAĐENJE	Blue
BROJ OKRETAJA [o/min]	150
SILA [N]	ručno

Nakon poliranja uzorci se ispiru u vodi i alkoholu. Tako pripremljeni uzorci spremni su za promatranje pod mikroskopom.

5.4. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju OLYMPUS GX51, prikazanom na slici 18. Mikrostruktura je analizirana u poliranom i nagriženom stanju.



Slika 18: Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51

5.4.1. Kvalitativna analiza mikrostrukture

5.4.1.1. Polirano stanje

Kvalitativna analiza mikrostrukture provedena je prvo u poliranom stanju. Na slikama od 19 do 22 prikazane su fotografije polirane površine snimljene pri povećanju od 500x.

U osnovnom materijalu obje cijevi vidljive su sitne, usmjerene nakupine, slike 19 i 21. U metalu zavora, u poliranom stanju, na obje cijevi nisu uočene nikakve nepravilnosti, kao što pokazuju slike 20 i 22.



Slika 19: Osnovni materijal uzorka M, u poliranom stanju



Slika 20: Površina uzorka M u području metala zavara, u poliranom stanju



Slika 21: Osnovni materijal uzorka V, u poliranom stanju



Slika 22: Površina uzorka V u području metala zavora, u poliranom stanju

5.4.1.2. Nagriženo stanje

Mikrostruktura ispitnih uzoraka izazvana je nagrivanjem u vodenoj otopini natrijevog cijanida [NaCN] i amonijevog persulfata $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$.

Otopina je napravljena po sljedećoj recepturi:

5 g NaCN,

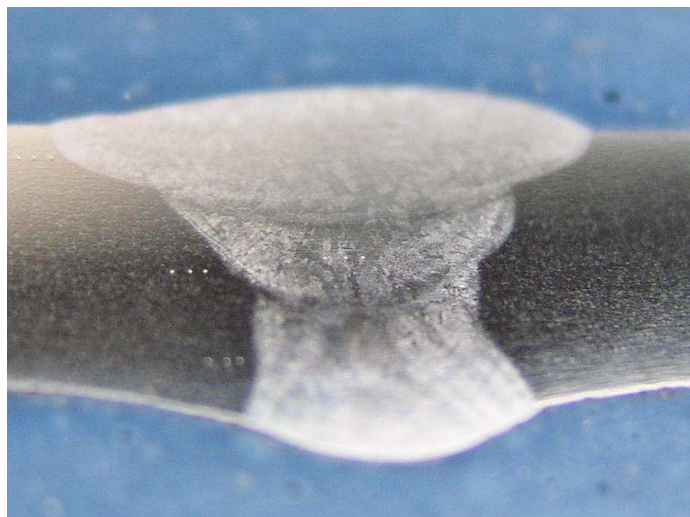
5 g $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$,

100 ml H_2O .

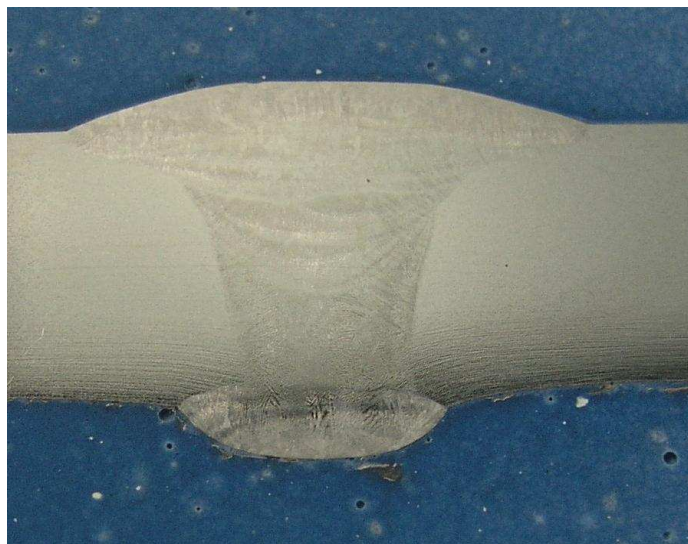
Ukupno trajanje nagrivanja bilo je 50 sekundi. Nakon nagrivanja uzorci su isprani u vodi i alkoholu. Nagrivanje je dalo željene rezultate tj. otkrivena je tražena mikrostruktura materijala.

Isti uzorci su korišteni i za makro nagrivanje.

Na slikama 23 i 24 prikazane su fotografije makronagriženih uzoraka zavarenih spojeva na užoj i široj cijevi. Na slikama se jasno vidi geometrija zavora s tri primijenjena prolaza.



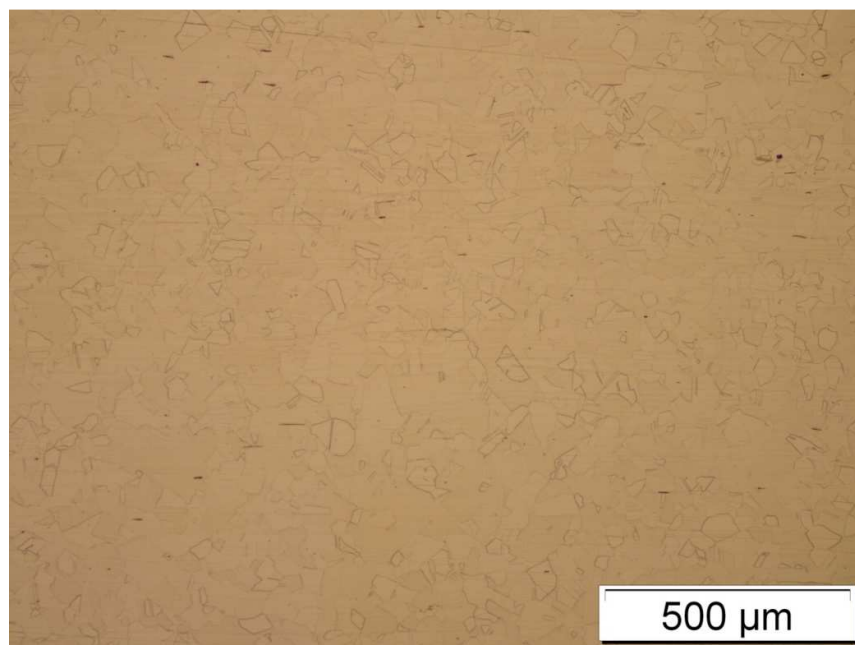
Slika 23: Makro nagriveni uzorak zavarenog spoja, uzorak M



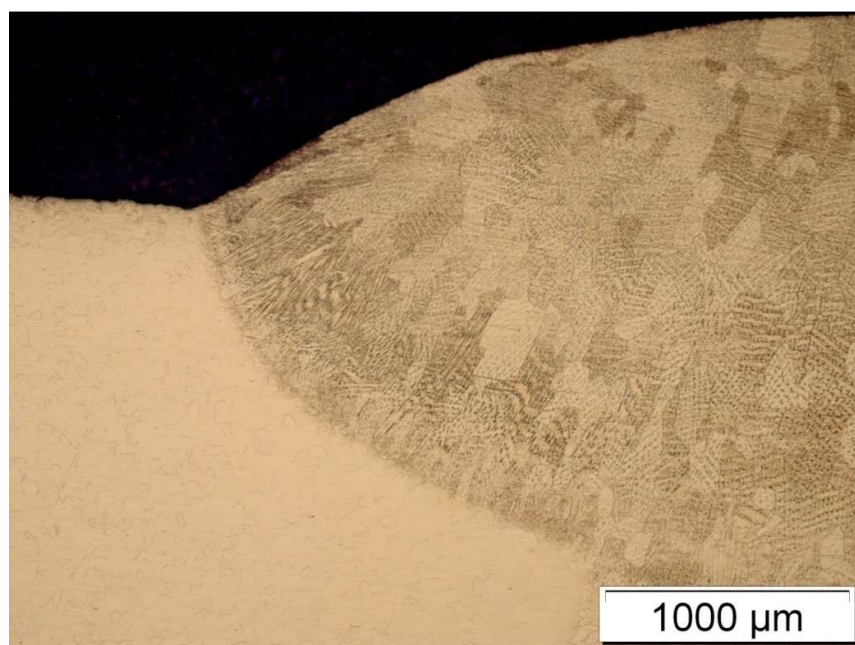
Slika 24: Makro nagriženi uzorak zavarenog spoja, uzorak V

Rezultati analize mikrostrukture u nagriženom stanju prikazani su na slikama 25 do 46.

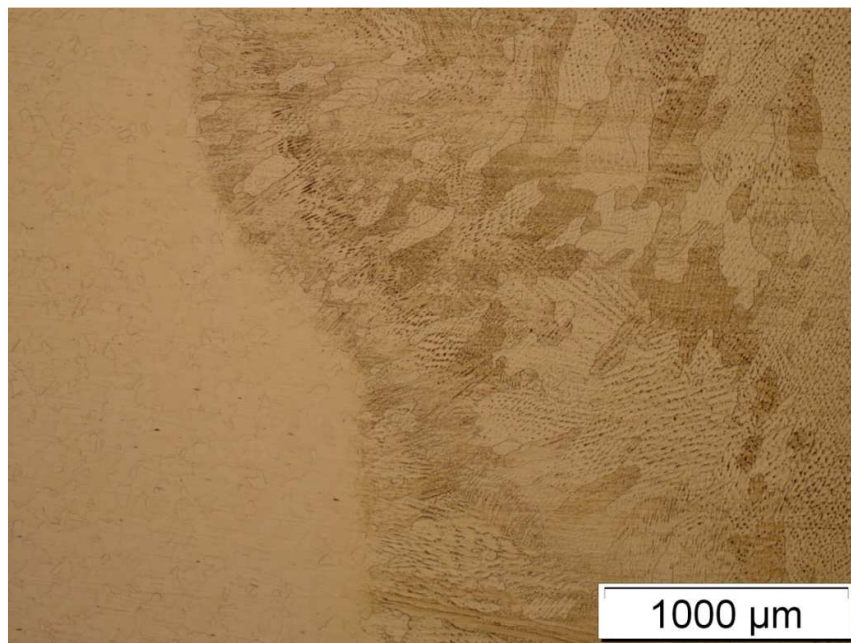
Na slici 25 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala uže cijevi. Vidi se monofazna mikrostruktura i kristalna zrna ujednačena po veličini. Mogu se primjetiti karakteristični neidentificirani nemetalni uključci (crne točke). Na slici 35 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala šire cijevi. Veličina zrna je ovdje manje ujednačena u usporedbi sa osnovnim materijalom uzorka iz uže cijevi. Na slikama 29 do 31 vide se fotografije mikrostrukture metala zavara u tjemenu, sredini i korijenu zavara uže cijevi, a na slikama 39 do 42 iste pozicije za širu cijev. U metalu zavara oba uzorka vidljiva je klasična lijevačka mikrostruktura. Nema vidljivih mikropukotina, poroziteta, niti bilo kakvih drugih nepravilnosti. Na slikama 26 do 28 prikazana je zona utjecaja topline za užu cijev s lijeve strane, a na slikama 32 do 34 s desne strane zavara. Vidljivo je da zone utjecaja topline gotovo i nema. Na slikama 36 do 38 prikazana je zona utjecaja topline za širu cijev s lijeve strane, a na slikama 43 do 45 s desne strane zavara. Kao i na uzorku M sa uže cijevi, i ovdje zone utjecaja topline gotovo nema. Linija staljivanja je jasno izražena kod oba uzorka, i prikazana je na slici 46.



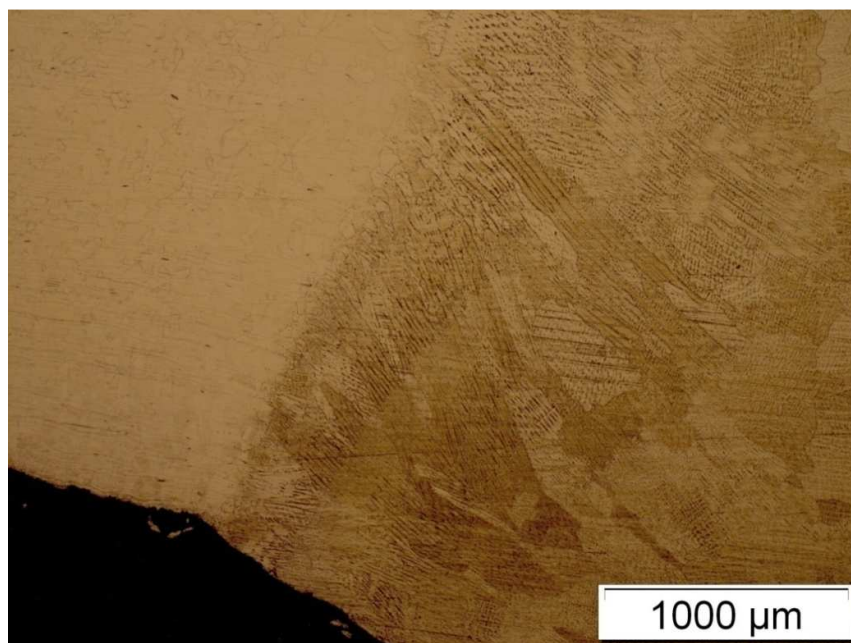
Slika 25: Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka M



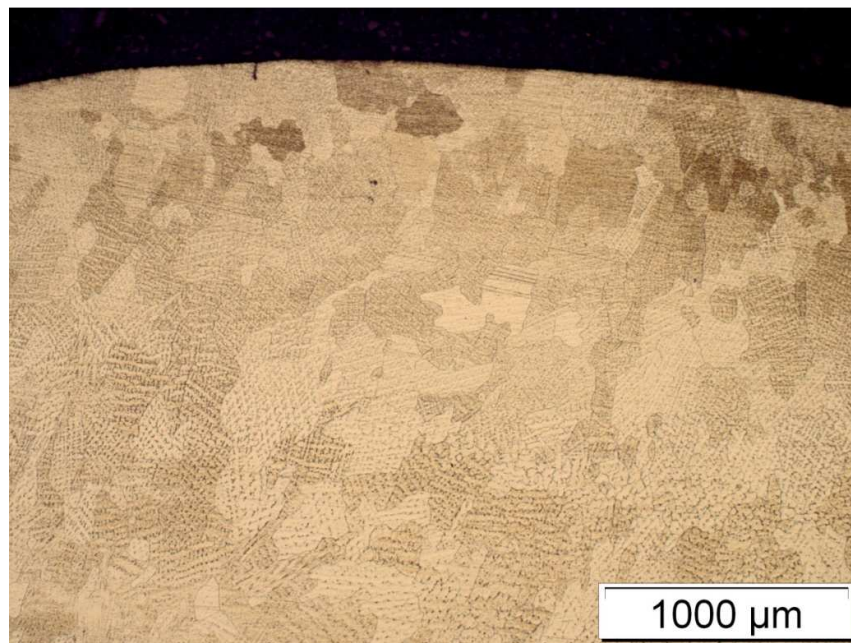
Slika 26: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka M, lijevo



Slika 27: Mikrostruktura zone utjecaja topline sredine zavora uzorka M, lijevo



Slika 28: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka M, lijevo



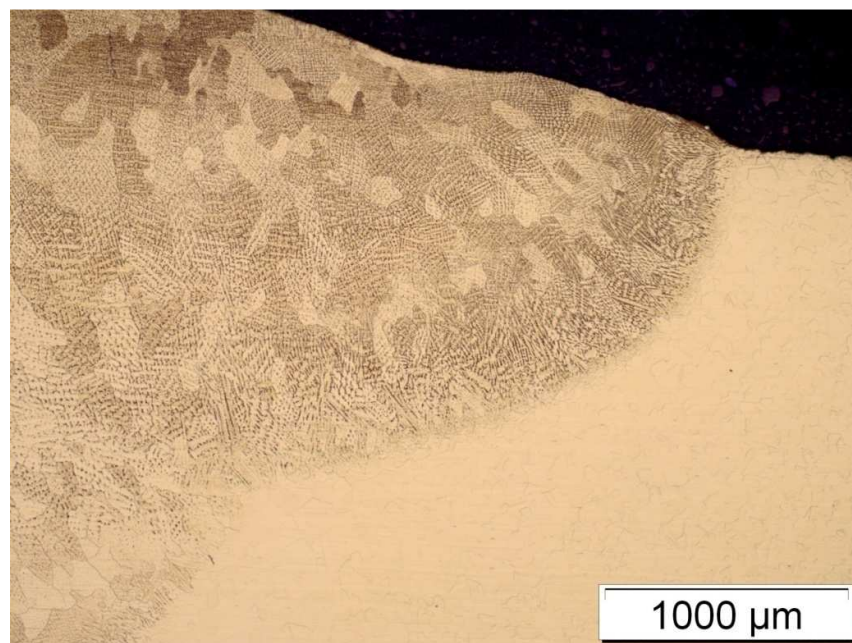
Slika 29: Mikrostruktura metala zavara u tjemenu uzorka M



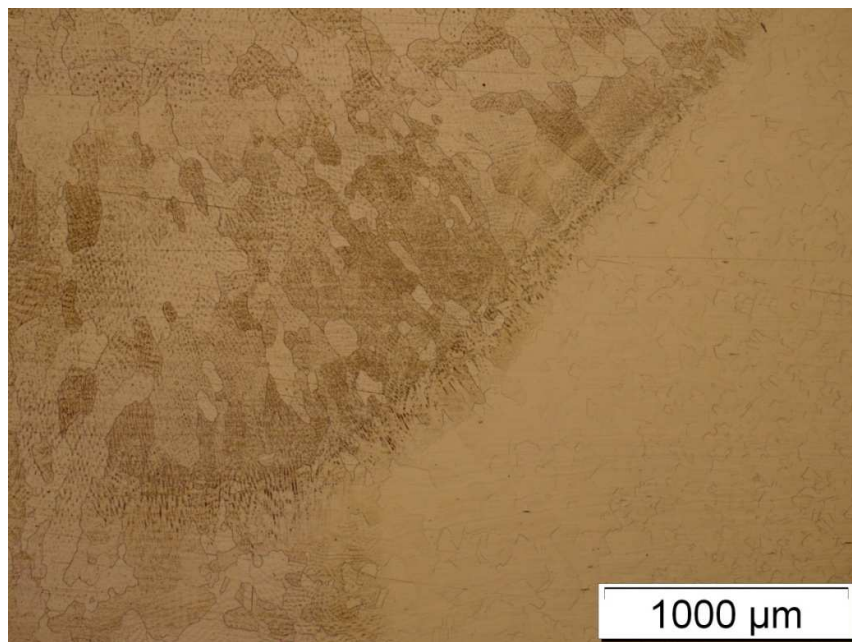
Slika 30: Mikrostruktura metala zavara u sredini uzorka M



Slika 31: Mikrostruktura metala zavara u korijenu uzorka M



Slika 32: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavara uzorka M, desno

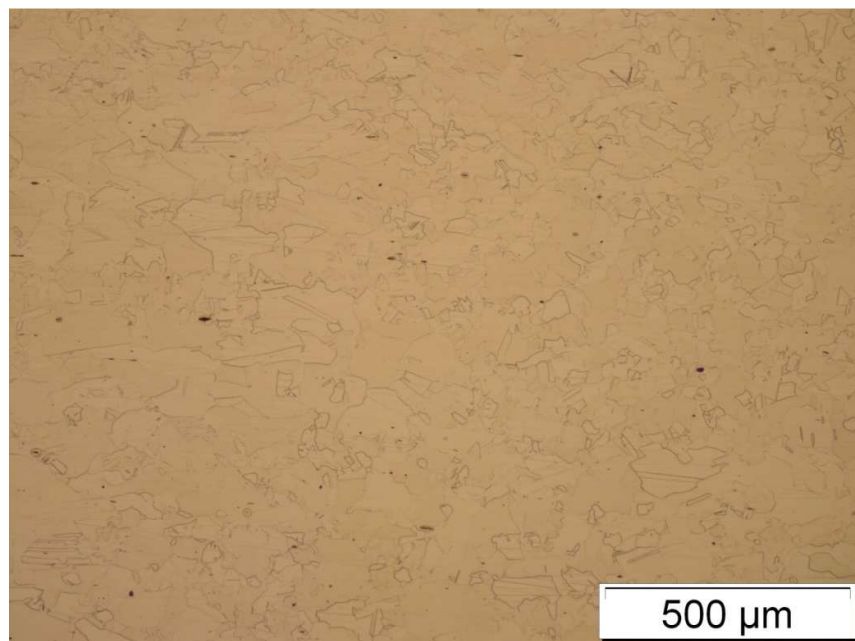


Slika 33: Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavara uzorka M, desno

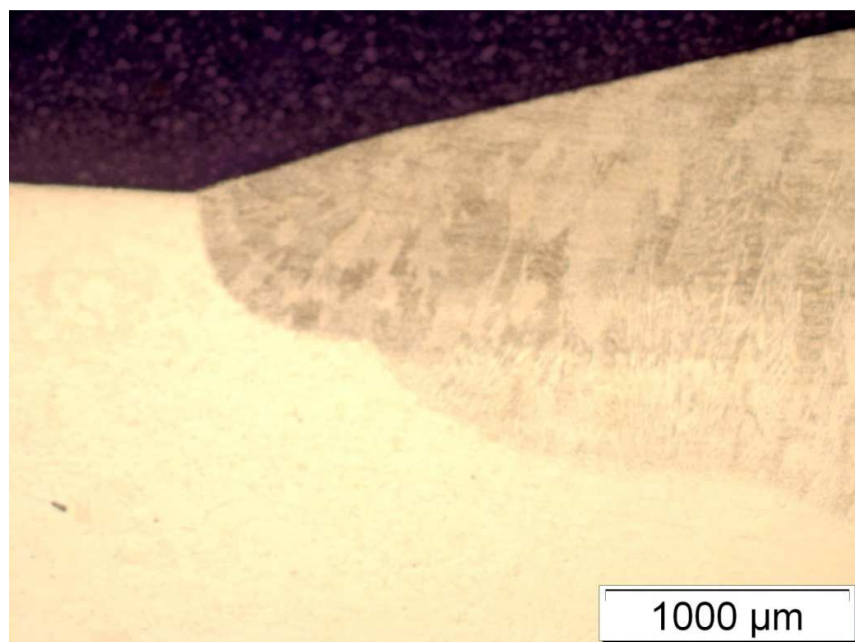


Slika 34: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavara uzorka M, desno

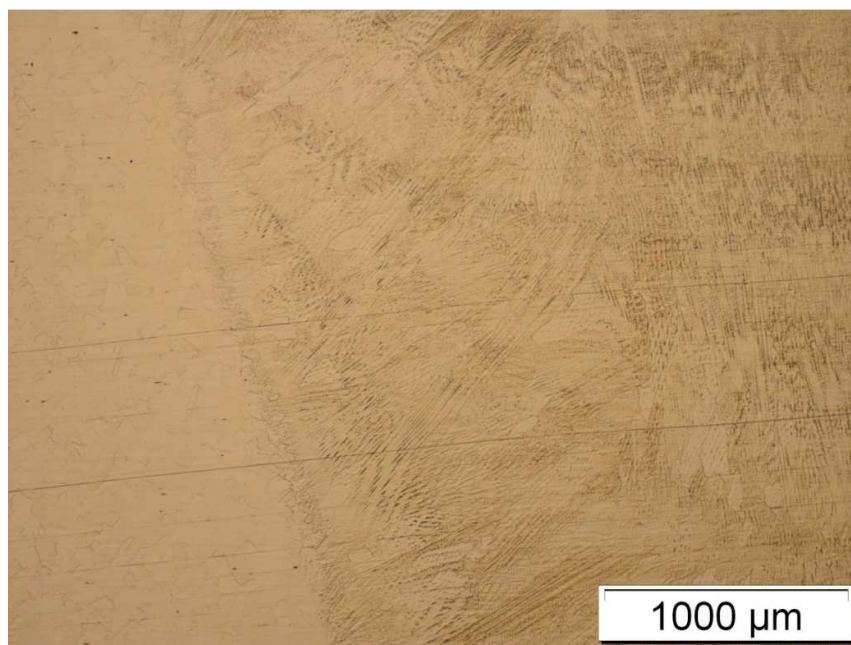
Slijede slike mikrostrukture za uzorak iz šire cijevi.



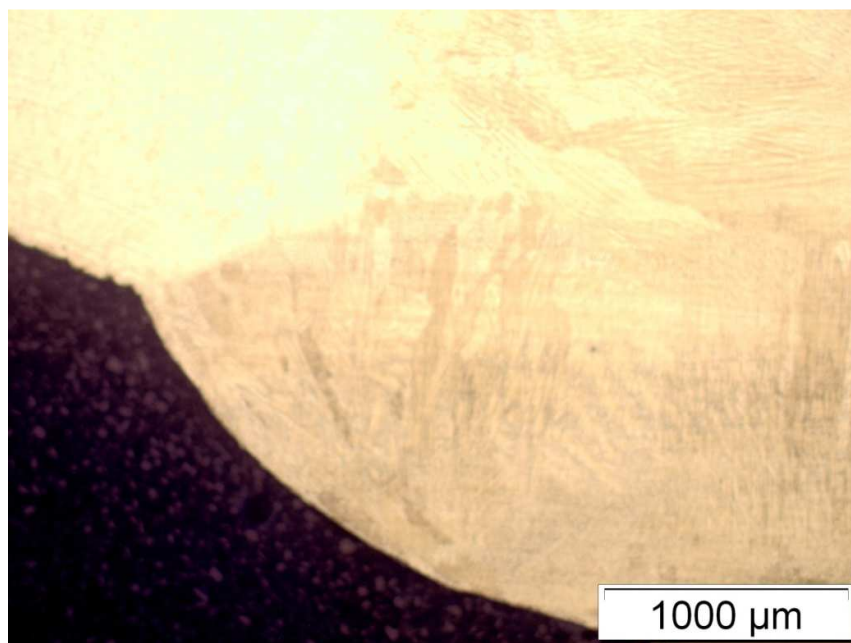
Slika 35: Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka V



Slika 36: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka V, lijevo



Slika 37: Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora uzorka V, lijevo



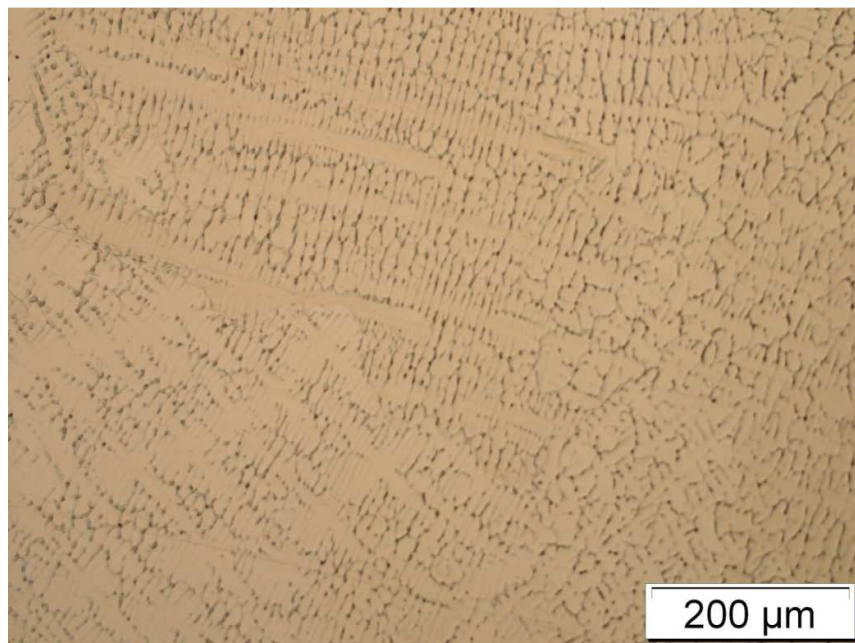
Slika 38: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka V, lijevo



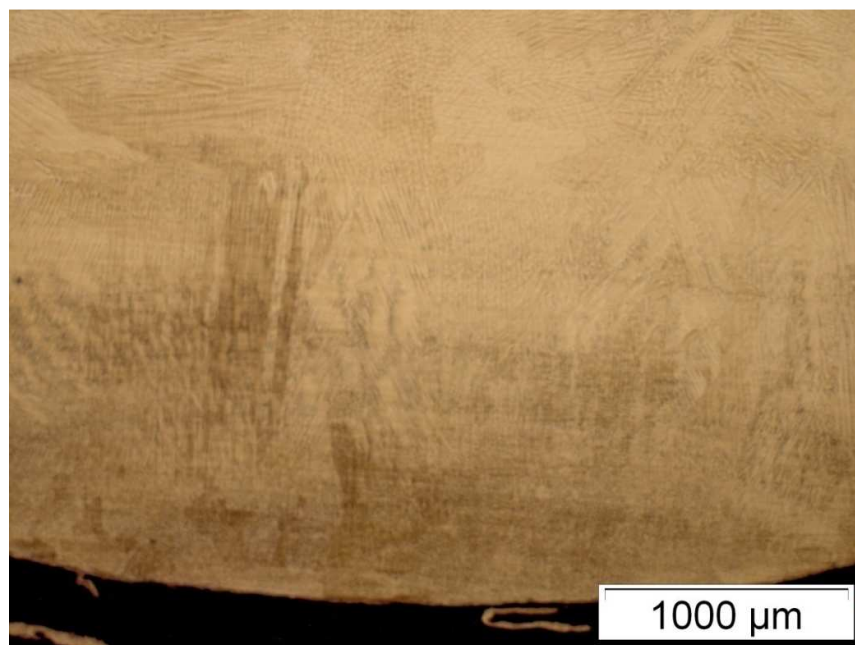
Slika 39: Mikrostruktura metala zavara u tjemenu uzorka V



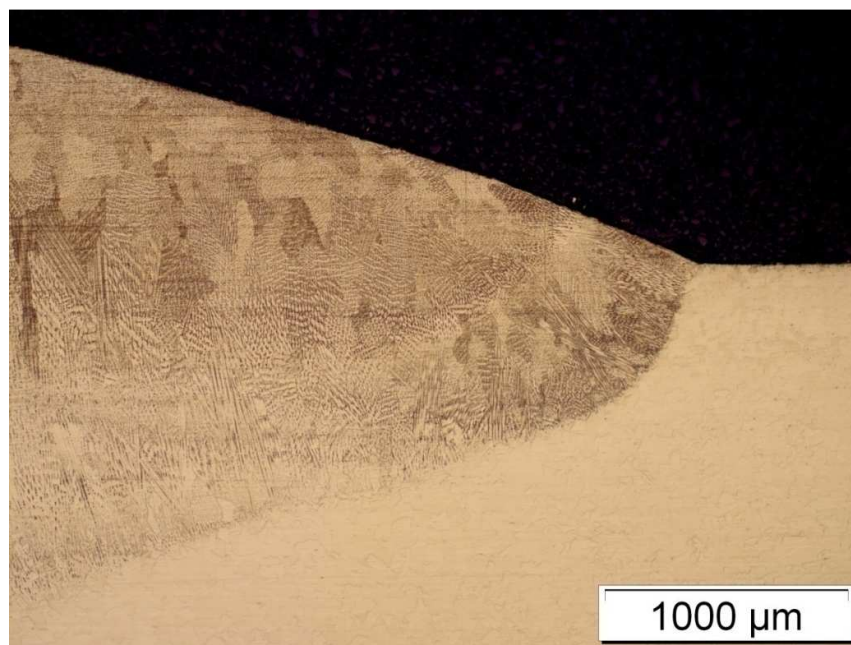
Slika 40: Mikrostruktura metala zavara u sredini uzorka V



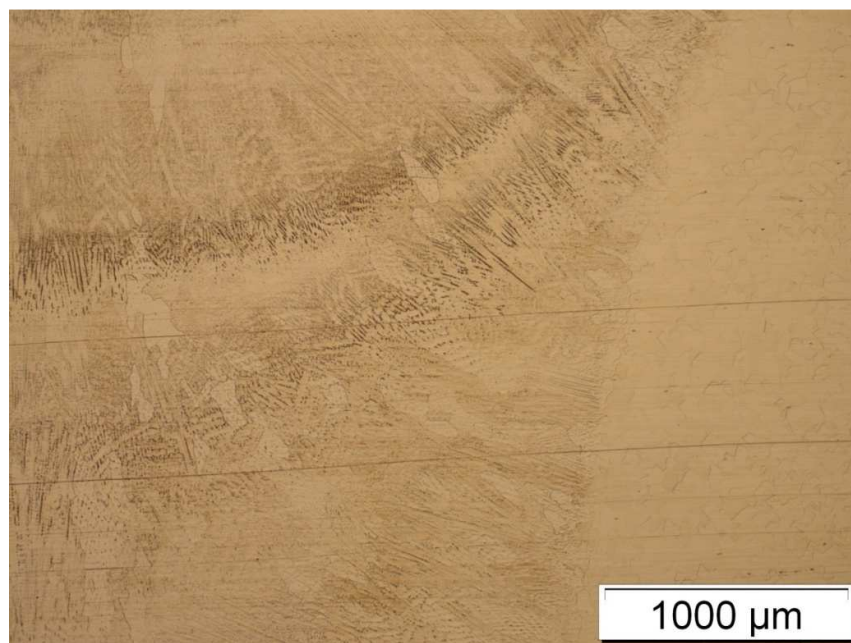
Slika 41: Mikrostruktura metala zavora u sredini uzorka V



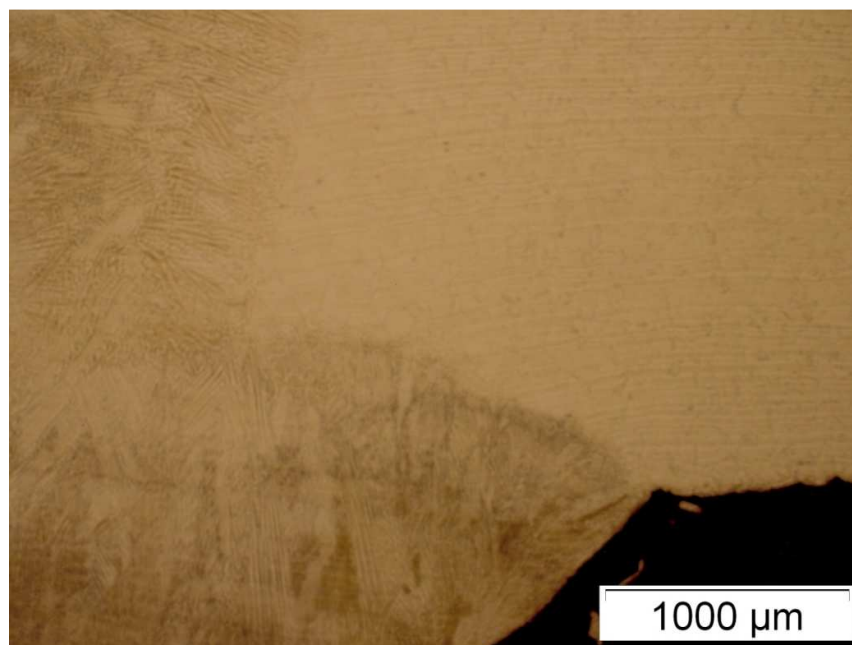
Slika 42: Mikrostruktura metala u korijenu zavora uzorka V



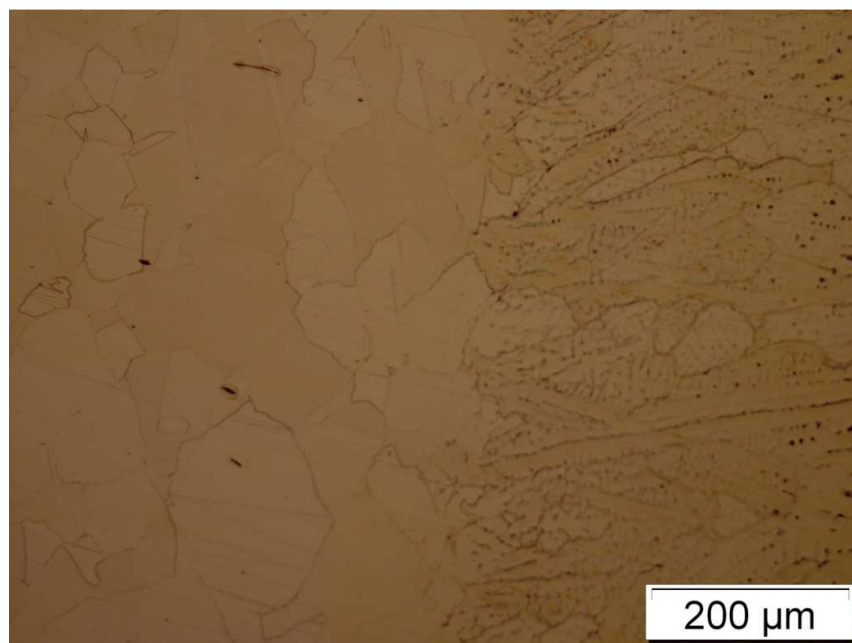
Slika 43: Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora uzorka V, desno



Slika 44: Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora uzorka V, desno



Slika 45: Mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora uzorka V, desno



Slika 46: Mikrostruktura linije staljivanja uzorka V

5.4.2. Kvantitativna analiza mikrostrukture

5.4.2.1. Volumni udjeli mikrostrukturnih faza

Mikrostruktura osnovnog materijala oba ispitana uzorka sastoji se, gotovo u potpunosti, od samo jedne faze – γ kristala mješanaca. Obzirom da je vidljiva vrlo mala količina neidentificiranih nemetalnih uključaka u osnovnom materijalu, može se zaključiti da je njihov udio manji od 0,5 %. Takvi uključci su karakteristični u tim količinama za mikrostrukturu ovog materijala.

5.4.2.2. Veličina zrna

Veličina zrna određena je u osnovnom materijalu metodom usporedbe. Rezultat usporedbe je pokazao da je veličina zrna između 5 i 6. Zrna su ujednačena po obliku i veličini.

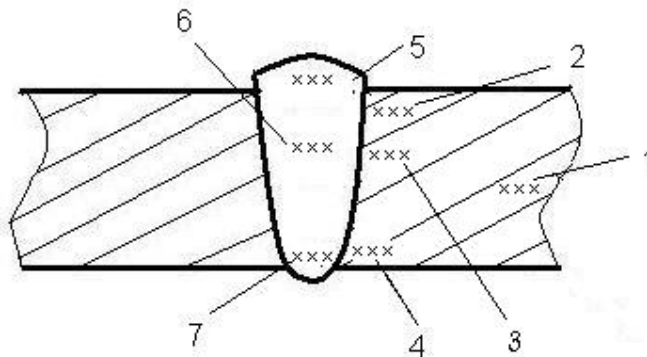
5.4.2.3. Mikrotvrdoća, HV 0,2

Mikrotvrdoća HV 0,2 je mjerena metodom po Vickersu na uređaju WILSON-WOLPERT TUKON 2100 B proizvođača INSTRON, koji je prikazan na slici 47. Izvršena su mjerenja s opterećenjem od 1,96 N (HV 0,2). Penetrator je istostrana, četverostrana dijamantna piramida s kutom među stranicama 136 stupnjeva. Mikrotvrdoća je mjerena na osnovnom materijalu, metalu zavara i zoni utjecaja topline.

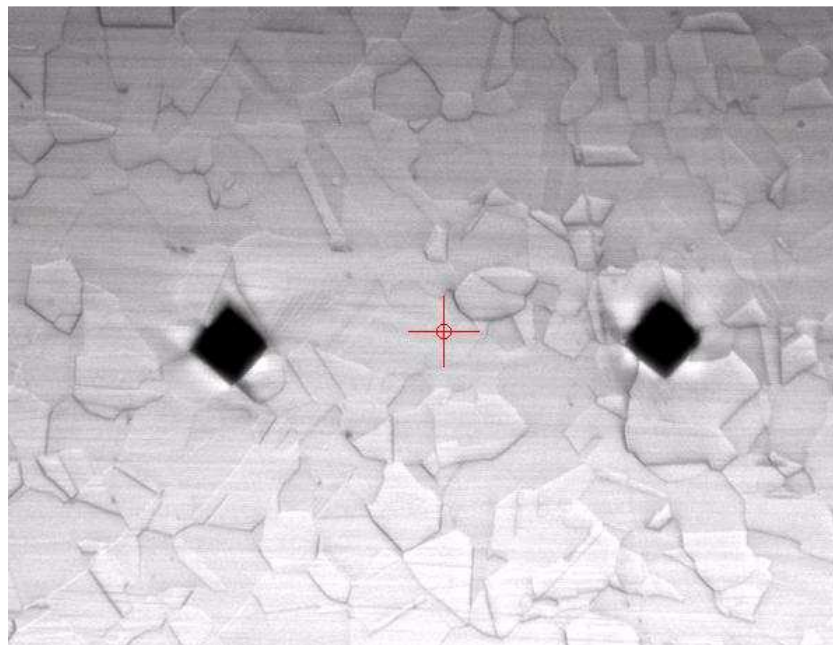


Slika 47: Mikrotvrdomjer WILSON-WOLPERT TUKON 2100 B proizvođača INSTRON

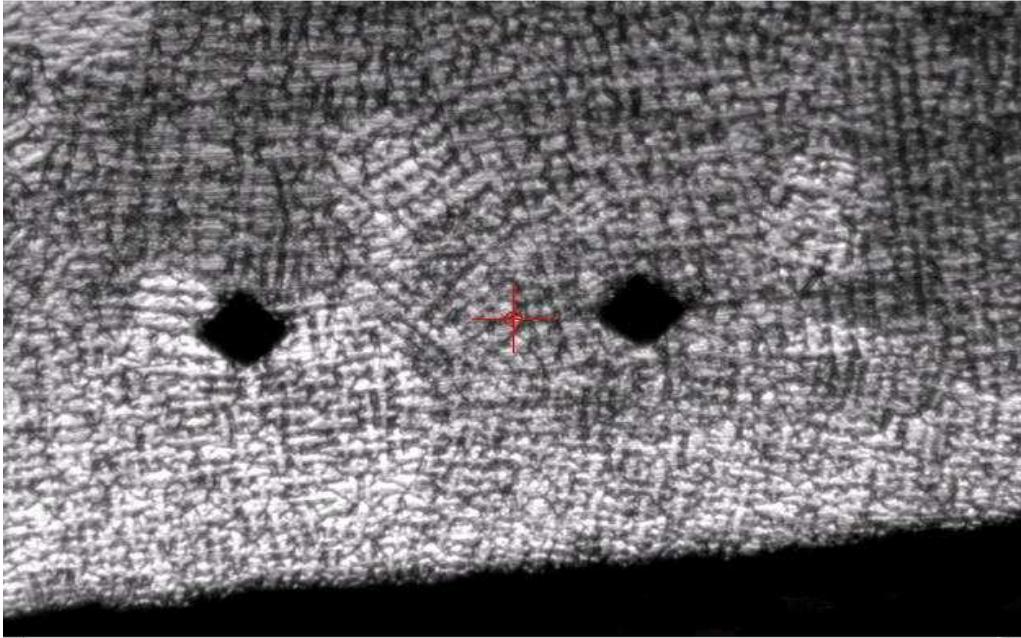
Na slici 48 shematski su prikazana mjesta na kojima je mjerena mikrotvrdoća, a slike 49 i 50 prikazuju primjer otisaka koje ostavlja penetrator na površini uzorka. fotografirane pri povećanju 100x. Otisci su napravljeni jedan do drugog, na približno jednakim razmacima.



Slika 48: Shematski prikaz pozicija na kojima je mjerena mikrotvrdoća



Slika 49: Primjer otiska koji ostavlja penetrator u osnovnom materijalu uzorka M



Slika 50: Primjer otiska koji ostavlja penetrator u zavaru uzorka M

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće prikazani su u tablicama 23 i 24.

Tablica 23 Rezultati mjerenja tvrdoće pri opterećenju HV 0,2 za uzorak sa manje cijevi

Mjesto ispitivanja	Pozicija	Izmjerena tvrdoća	Srednja vrijednost
Osnovni materijal	1	156	154
		159	
		146	
Zona utjecaja topline	2	146	149
		148	
		152	
	3	150	152
		153	
		152	
	4	152	155
		157	
		156	
Metal zavora	5	149	147
		148	
		145	
	6	135	146
		152	
		150	
	7	144	142
		144	
		139	

Tablica 24 Rezultati mjerenja tvrdoće pri opterećenju HV 0,2 za uzorak sa veće cijevi

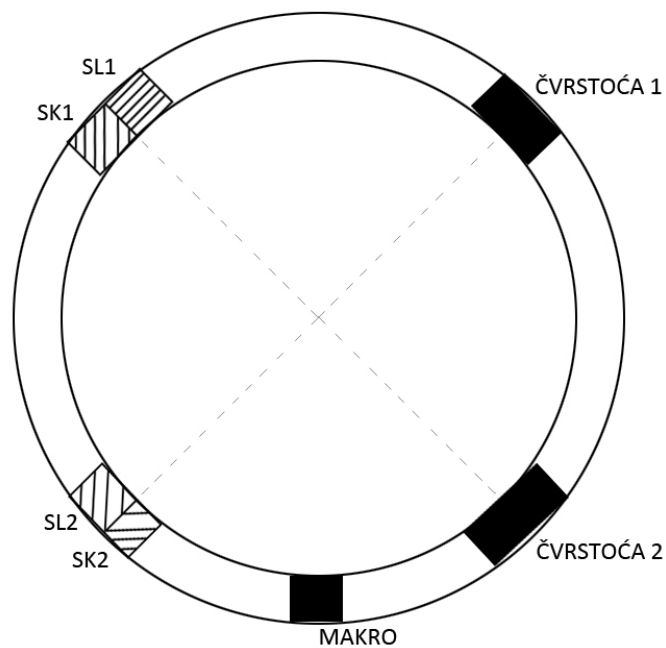
Mjesto ispitivanja	Pozicija	Izmjerena tvrdoća	Srednja vrijednost
Osnovni materijal	1	197	197
		205	
		189	
Zona utjecaja topline	2	156	167
		165	
		180	
	3	152	153
		157	
		149	
	4	178	175
		178	
		170	
Metal zavora	5	152	147
		143	
		145	
	6	155	148
		148	
		141	
	7	160	161
		160	
		162	

5.5. Mehanička ispitivanja

U sklopu ispitivanja zavarenog spoja napravljena su ispitivanja određenih mehaničkih svojstava, kao što su ispitivanje vlačne čvrstoće i ispitivanja savijanja. Ispitivanja su provedena u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o. Za ispitivanje je korištena univerzalna kraljica vrste 30 TUZ 757 nazivne sile 300 kN u mjernom području 0-60 kN prema uvjetima norme EN 15614-1. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 25, a skica položaja rezanja mehaničkih proba na slici 51.

Tablica 25 Izvještaj o mehaničkim svojstvima

Oznaka položaja	Dimenzije [mm]	Površina presjeka [mm ²]	Maksimalna sila [N]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Savijanje	
					Ø trna /Razmak [mm]	Kut savijanja [°]
Č1	12,11 x 5,53	66,97	36400	544	-	-
Č2	12,04 x 5,61	67,54	35400	524	-	-
SL1	10 x 5,49	-	-	-	25/40	180
SL2	10 x 5,49	-	-	-		
SK1	10 x 5,49	-	-	-	-	-
SK2	10 x 5,49	-	-	-	-	-

**Slika 51:** Skica položaja rezanja mehaničkih proba

6. Analiza rezultata

6.1. Osvrt na analizu mikrostrukture

Makroanalizom zavarenog spoja kod oba uzorka uočena je pravilna geometrija zavora. Jasno su vidljiva tri prolaza zavarivanja.

Mikrostrukturnom analizom osnovnog materijala u poliranom stanju uočene su sitne, usmjerene nakupine nemetalnih uključaka kod oba uzorka. Ovakve nakupine, čiji je volumni udio zanemarivo mali, karakteristične su za ispitivani materijal.

U metalu zavora, analizom u poliranom stanju, nisu uočene nikakve nepravilnosti.

Mikrostrukturnom analizom osnovnog materijala uže cijevi u nagriženom stanju, uočena je monofazna kristalna mikrostruktura. S obzirom na kemijski sastav osnovnog materijala može se zaključiti da se radi o γ kristalima mješancima. Kristalna zrna su ujednačena po veličini i obliku. Vidljivi su i karakteristični nemetalni uključci.

Zone utjecaja topline praktički nema, a linija staljivanja je jasno izražena.

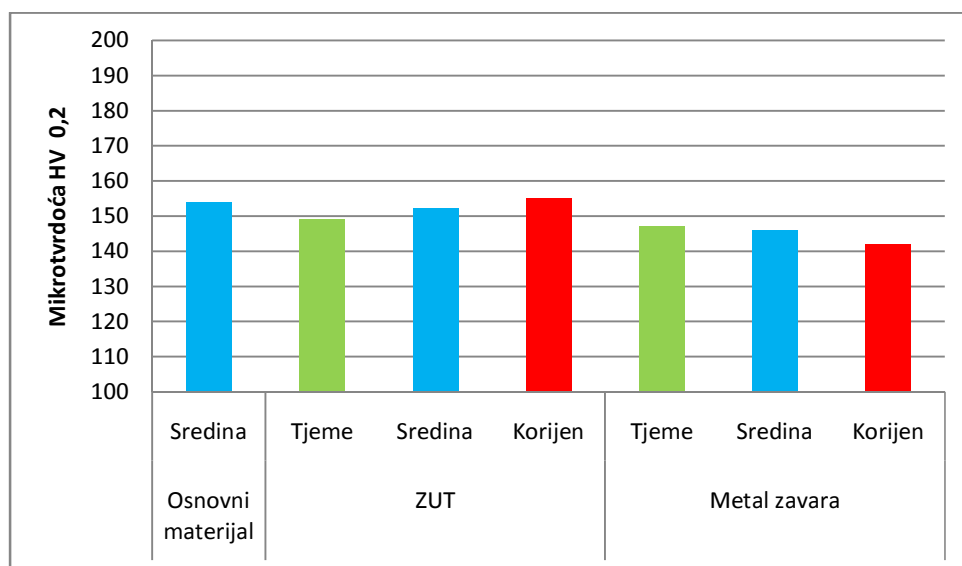
Mikrostruktura metala zavora je tipična lijevačka mikrostruktura u kojoj nisu uočene nikakve nepravilnosti.

Mikrostrukturnom analizom osnovnog materijala šire cijevi također je uočena monofazna kristalna mikrostruktura s karakterističnim nemetalnim uključcima za ovaj materijal. U odnosu na uzorak s uže cijevi veličina zrna nije toliko ujednačena.

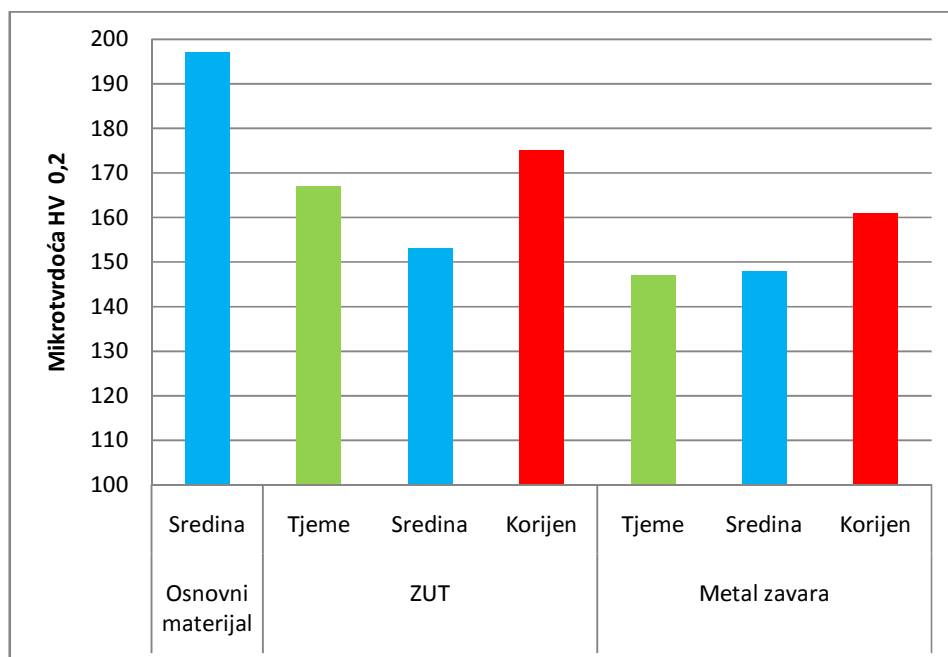
Zone utjecaja topline i kod ovog uzorka praktički nema, a linija staljivanja je jasno izražena. Analizom metala zavora u ovom uzorku također je uočena tipična lijevačka mikrostruktura, u kojoj nisu uočene nikakve nepravilnosti.

Kvantitativnom analizom utvrđena je veličina zrna γ faze metodom usporedbe. Oba uzorka imaju veličinu zrna između 5 i 6.

Nakon izvršenih mjerenja mikrotvrdoće HV 0,2 rezultati su analizirani i uspoređeni. Dijagramom, na slici 52 prikazane su srednje vrijednosti mikrotvrdoće osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavora za užu cijev. Nema značajne razlike u vrijednostima mikrotvrdoće između osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavora. Također nema značajnije razlike u vrijednostima mikrotvrdoće u tjemenu, sredini i korijenu zavora. Dijagramom, na slici 53 prikazane su srednje vrijednosti mikrotvrdoće osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavora za širu cijev. Osnovni materijal ovog uzorka je znatno tvrdi od osnovnog materijala uzorka uže cijevi. Tvrdoća korijena zavora kod ovog uzorka je nešto viša od tvrdoće sredine i tjemena zavora, u zoni utjecaja topline i metalu zavora.



Slika 52: Prikaz izmjerenih mikrotvrdoća za užu cijev



Slika 53: Prikaz izmjerenih mikrotvrdoća za širu cijev

6.2. Osvrt na ispitivanja mehaničkih svojstva

Statičkim vlačnim ispitivanjem uzoraka, utvrđeno je da su dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće u propisanim granicama (482-586 N/mm²).

Bočnim savijanjem uzoraka za 180° određena je otpornost na savijanje. Analiziranjem savijenih uzoraka vidljivo je da nije došlo do pojave pukotina uslijed savijanja.

7. Zaključak

Cilj ovog rada je bilo metalografsko ispitivanje kvalitete zavarenog spoja legure Monel 400. Zbog velikog unosa topline pri zavarivanju može doći do promjene mikrostrukture osnovnog materijala. Posljedica toga mogu biti promijenjena mehanička svojstva i korozijska otpornost materijala, naročito u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Metalografsko ispitivanje je samo jedan od postupaka kontrole zavarenog spoja.

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

- Makroanalizom zavarenog spoja utvrđena je pravilna geometrija zavara s jasno izraženim prolazima.
- Mikroanalizom uzoraka u poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti niti na jednom uzorku.
- Mikrostruktura osnovnog materijala je monofazna i sastoji se od γ kristala mješanaca. U mikrostrukturi je prisutna vrlo mala količina nemetalnih uključaka. Kristalna zrna γ faze su ujednačena po veličini, a veličina zrna je 5 do 6.
- Zona utjecaja topline je vrlo mala, a linija staljivanja je jasno izražena.
- Mikrostruktura metala zavara je tipična lijevačka mikrostruktura, bez nepravilnosti.
- Mjerenjem mikrotvrdoće HV 0,2 utvrđeno je da nema velike razlike u mikrotvrdoći između osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara. Kod uzorka sa šire cijevi u korijenu zavara su izmjerene nešto više tvrdoće od onih u sredini i tjemenu zavara.
- Rezultati mehaničkih ispitivanja pokazuju da materijal ima zadovoljavajuća mehanička svojstva.
- Opći zaključak – zavareni spoj je kvalitetno izrađen i analizom mikrostrukture zavarenog spoja nisu uočene nikakve nepravilnosti.

8. Literatura

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>
- [2] <http://www.periodni.com/hr/ni.html>
- [3] <http://www.lenntech.com/periodic/elements/ni.htm>
- [4] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_nickel_alloys
- [5] <http://www.nickel-alloys.net/index.html>
- [6] <http://www.nickelinstitute.org/>
- [7] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/ni/>
- [8] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2193>
- [9] <http://www.specialmetals.com/documents/Nickel%20200%20&%20201.pdf>
- [10] http://www.painc.com/mechanical_properties.htm
- [11] Pavić J., Duspara M., Horvat M., Zavarivanje legure MONEL 400 TIG postupkom zavarivanja, 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2011 SUVREMENE TEHNOLOGIJE I POSTUPCI PRI IZRADI TLAČNE OPREME, ZAVARENIH METALNIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, Slavonski brod, listopad 2011.
- [12] http://www.nikosteel.com/ferous_metal.htm
- [13] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=1364d8231703476b8c466cdd07be71b7&ckck=1>
- [14] <http://www.springerlink.com/content/f015102213717734/>
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/North_American_X-15
- [16] http://www.copper.org/applications/cuni/txt_dki.html
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/Monel>
- [18] <http://www.specialmetalswelding.com/products/datash/we190.pdf>
- [19] <http://www.specialmetals.com/documents/Monel%20alloy%20400.pdf>
- [20] Cambell F., Nickel, Cobalt and Their alloys, ASM International, USA, prosinac 2000.
- [21] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5110>
- [22] Slobodan Kralj: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje I, FSB, Zagreb

[23] http://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom

[24] www.fsb.hr/zavkon

[25] Ivan Juraga, Kruno Ljubić, Milan Živčić: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2000.